



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Αειφόρος Αγροτική Παραγωγή και Διαχείριση Περιβάλλοντος

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΠΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Διερεύνηση της Χρήσης Λιπασμάτων Ελεγχόμενης Απελευθέρωσης
Στοιχείων για την Παρασκευή Θρεπτικών Διαλυμάτων Ανθοκομικών
Υδροπονικών Καλλιεργειών**

ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΒΟΛΟΣ 2016

**Διερεύνηση της Χρήσης Λιπασμάτων Ελεγχόμενης Απελευθέρωσης Στοιχείων για
την Παρασκευή Θρεπτικών Διαλυμάτων Ανθοκομικών Υδροπονικών Καλλιεργειών**

ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΜΑΡΙΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

**Λύκας Χρήστος, Επίκουρος καθηγητής (επιβλέπων), Ανθοκομία και Αρχιτεκτονική
τοπίου, Παν.Θεσσαλίας.**

**Κατσούλας Νικόλαος, Αναπληρωτής καθηγητής(μέλος), Γεωργικές κατασκευές,
Παν. Θεσσαλίας.**

**Πετρόπουλος Σπυρίδων, Επίκουρος καθηγητής(μέλος), Λαχανοκομία,
Παν.Θεσσαλίας.**

Copyright © ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΜΑΡΙΑ, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών, κρίνω απαραίτητο να ευχαριστήσω εκείνους τους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν έμπρακτα καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Αρχικά, θα ήθελα ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και Επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής κ.Λύκα Χρήστο, Επίκουρο καθηγητή Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής τοπίου, για την αμέριστη συμπαράστασή του και βοήθεια που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, εκφράζω τις ευχαριστίες μου στους κ.κ Κατσούλα Νικόλαο , Αναπληρωτή καθηγητή και Πετρόπουλο Σπυρίδωνα, Επίκουρο καθηγητή για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην ευχαριστήσω την εταιρεία Haifa chemicals L.t.d και προσωπικά τον κ.Ρώσογλου Αθανάσιο, Διευθύνοντα σύμβουλο της εταιρείας, για την παραχώρηση των υλικών για τη διεξαγωγή του πειράματος της μεταπτυχιακής διατριβής μου, καθώς και για την αδιάκοπη στήριξή του σε ότι χρειαζόμουν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή την οποία επέδειξαν και για το κουράγιο που μου έδιναν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Ζωγράφου Μαρία

Βόλος, 2016

Περίληψη

Τα λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης (CRF) εισήχθησαν στην παγκόσμια αγορά τα τελευταία χρόνια, σε μια προσπάθεια των βιομηχανιών λιπασμάτων να βρουν τρόπους για να καλύψουν διάφορες ανάγκες είτε των καλλιεργειών, είτε των ίδιων των παραγωγών. Τα CRF, σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, υπόσχονται ελεγχόμενη απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων, απόλυτα συγχρονισμένων χρονικά με τις ανάγκες της καλλιέργειας.

Ωστόσο, μελέτες που να αφορούν τη χρήση των συγκεκριμένων λιπασμάτων σε υδροπονικές μεθόδους καλλιέργειας δεν υφίστανται σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των CRF λιπασμάτων για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος που χρησιμοποιείται σε υδροπονικές καλλιέργειες. Για την επίτευξη του σκοπού, μελετήθηκαν οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων 2 τύπων λιπασμάτων CRF σε υδατικό διάλυμα σε συνάρτηση με τον χρόνο, το pH και τον όγκο των διαλυμάτων. Έτσι, σε υδατικά διαλύματα μικρών (100 και 300ml) και μεγάλων όγκων (4lt) που προέκυψαν από διάλυση ποσότητας των λιπασμάτων Multicote, 4m, 14-14-14 και 15-7-15 της εταιρείας Haifa Chemicals L.t.d, τα οποία ρυθμίστηκαν αρχικά σε pH 5,5, 6 και 6,5, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων NO_3 , NH_4 , PO_4 και K συναρτήσει του χρόνου. Τα διαλύματα παρέμειναν σε σταθερή θερμοκρασία (24°C) ενώ δύο από αυτά τοποθετήθηκαν στους 18°C, μετά την παρέλευση 4 ημερών.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε ότι: i) το pH του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζει άμεσα την απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων είτε χρονικά, είτε ποσοτικά, ii) η μεταβολή της τιμής του pH μπορεί να έχει το ίδιο αποτέλεσμα που θα είχε και η μεταβολή της θερμοκρασίας του διαλύματος, iii) το χαμηλό pH του θρεπτικού διαλύματος φαίνεται να ευνοεί την άμεση απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων σε διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14, ενώ το υψηλότερο pH σε διαλύματα που παρασκευάζονται με χρήση του λιπάσματος 15-7-15, iv) ο μεγάλος όγκος των θρεπτικών διαλυμάτων καθυστερεί την εμφάνιση της μέγιστης συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα, καθώς παρουσιάζεται μία χρονική υστέρηση στην επίτευξή της, ενώ στους μικρούς όγκους αυτή επιτυγχάνεται γρήγορα, v) είναι δυνατή η χρήση ενός μαθηματικού προσομοιώματος στο οποίο παράγοντες αποτελούν το pH του θρεπτικού διαλύματος, ο όγκος του θρεπτικού διαλύματος και ο χρόνος από την ημέρα παρασκευής του που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των NO_3 , NH_4 , PO_4 , και K, σε θρεπτικά διαλύματα που έχουν παρασκευασθεί με χρήση CRF λιπασμάτων.

Λέξεις-κλειδιά: multicote, υδρολίπανση, θρεπτικά στοιχεία, εκτός εδάφους καλλιέργεια, μαθηματικό προσομείωμα.

Summary

Controlled release fertilizers (CRF) were introduced in the global market in recent years, in an attempt on behalf of the fertilizer industries to find ways to satisfy different needs either of crops, or of the producers themselves. The CRF, according to their specifications, promise controlled release of nutrients, perfectly synchronized in time with the needs of the crops.

However, studies that are related to the use of these specific fertilizers in soilless culture do not exist according to research in bibliography.

The objective cause of this study is to explore the possibility of CRF fertilizers to be used for the production of nutrient solution used in soilless culture. To achieve this aim, the factors that affect the release of nutrients of two types of CRF fertilizers in aqueous solution in relation to time, the pH and the volume of the solutions have been studied. Thus, in aqueous solutions of small (100 and 300ml) and large volumes (4lt) which resulted from the dissolution of an amount of Multicote fertilizers, 4m, 14-14-14 and 15-7-15 of Haifa Chemicals L.t.d company, originally settled in pH 5,5, 6 and 6.5, the concentrations of NO_3 , NH_4 , PO_4 and K were measured in relation to time. The solutions were kept at a fixed temperature (24°C) while two of them were placed at 18°C , after 4 days.

The analysis of the measurements showed that: i) the pH of the nutrient solution directly affects the release of nutrients either in terms of time or quantity, ii) the change in the pH values can cause the same effect which would have been caused by the change of the solution's temperature, iii) the low pH of the nutrient solution appears to favor the immediate release of the nutrients in solutions of fertilizer 14-14-14, while the highest pH in solutions that are compounded by the use of the fertilizer 15-7-15, iv) the large volume of nutrient solutions delays the occurrence of the maximum concentration in the nutrient solution, since a time lag occurs in its achievement, while in small volumes this is achieved quickly, v) the use of a mathematical model is possible, in which the factors are the pH of the nutrient solution, the volume of the nutrient solution and the time since the manufacturing date that can be used to estimate the concentrations of NO_3 , NH_4 , PO_4 , and K in nutrient solutions that have been compounded by the use of CRF fertilizers.

Keywords: multicote, fertigation, nutrients, soilless culture, empirical model

Εγώ, η Ζωγράφου Μαρία, είμαι συγγραφέας αυτής της Μ.Δ.Ε. Αυτή η Μ.Δ.Ε. αντικατοπτρίζει την έρευνα που έγινε από εμένα και δεν έχει υποβληθεί (εξ ολοκλήρου ή μέρος της) σαν προπτυχιακή διατριβή ή Μ.Δ.Ε. ή ως μέρος Διδακτορικής Διατριβής σε αυτό ή άλλο Προπτυχιακό ή Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ιδρυμάτων Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης του εσωτερικού ή εξωτερικού. Όποια συνεργασία καθώς και το μέγεθος αυτής δηλώνονται επακριβώς στο αντίστοιχο πεδίο αυτής της διατριβής. Επίσης έχω διαβάσει όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρατίθενται στο τέλος.

Υπογραφή Συγγραφέα

Ως επιβλέπων της έρευνας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή, δηλώνω ότι όλοι οι όροι του Εσωτερικού Κανονισμού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος έχουν τηρηθεί από την κα Ζωγράφου Μαρία.

Υπογραφή Επιβλέποντος
Καθηγητή

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	7
1.1.1 Η σημασία της υδροπονίας ως μέθοδος καλλιέργειας στην Ελλάδα.....	7
1.1.2 Συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών	8
1.1.2.1 Ρόλος των υποστρωμάτων στα υδροπονικά συστήματα.....	9
1.1.3 Εξοπλισμός εγκαταστάσεων για καλλιέργειες εκτός εδάφους.....	11
1.1.4 Εγκαταστάσεις παρασκευής θρεπτικού διαλύματος	11
1.1.4.1 Τύποι κεφαλών υδρολίπανσης.....	12
1.1.5 Παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος	14
1.1.6 Σύνθεση και διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος.....	14
1.1.6.1 Ποιότητα νερού	16
1.1.6.2 Χαρακτηριστικά θρεπτικού διαλύματος	16
1.1.6.2.1 Το pH του θρεπτικού διαλύματος.....	17
1.1.6.2.2 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος	17
1.1.6.2.3 Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος	18
1.1.6.2.4 Ρύθμιση του pH	19
1.1.6.2.5 Διαχείριση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας	20
1.1.6.2.6 Έλεγχος θερμοκρασίας θρεπτικού διαλύματος.....	20
1.1.6.2.7 Η οξυγόνωση του θρεπτικού διαλύματος	21
1.2 ΘΡΕΨΗ –ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.....	22
1.2.1 Αρχές διαχείρισης της θρέψης των φυτών σε υδροπονική καλλιέργεια	22
1.2.2 Έλεγχος των τριών βασικών στοιχείων (N, P, K) σε υδροπονικές καλλιέργειες.....	24
1.2.2.1 Άζωτο (N).....	24
1.2.2.2 Φώσφορος (P).....	25
1.2.2.3 Κάλιο (K).....	26
1.3 ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ	28
1.3.1 Γενικά.....	28
1.3.2 Λιπάσματα υψηλής απόδοσης	29
1.3.3 Λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF	30
1.3.3.1 Πλεονεκτήματα λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF .	32
1.3.3.2 Μειονεκτήματα λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF	32
1.3.3.3 Λιπάσματα με επικάλυψη πολυμερούς υλικού.	33

1.3.3.4 Λειτουργία μηχανισμού επικάλυψης	34
1.3.4 MULTICOTE	35
1.3.4.1 Πως είναι κατασκευασμένα τα Multicote® σύμφωνα με πληροφορίες της εταιρείας Haifa Chemicals L.t.d.....	35
2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	37
2.1 Εισαγωγή	37
2.2 Πειραματικός σχεδιασμός.....	37
2.3 Μετρήσεις	38
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	39
3.1 Μέτρηση της μεταβολής της τιμής του pH.....	39
3.2 Μέτρηση της συγκέντρωσης των NO ₃ σε θρεπτικά διαλύματα.....	49
3.3 Μέτρηση της συγκέντρωσης των NH ₄ σε θρεπτικά διαλύματα.	55
3.4 Μέτρηση της συγκέντρωσης των PO ₄ σε θρεπτικά διαλύματα.	60
3.5 Μέτρηση της συγκέντρωσης του K σε θρεπτικό διάλυμα.	66
3.6 Ανάπτυξη μαθηματικού προσομοιώματος εκτίμησης της συγκέντρωσης των NO ₃ , NH ₄ , PO ₄ και K σε θρεπτικά διαλύματα που παρασκευάστηκαν με χρήση CRF λιπασμάτων.....	71
3.7 Συμπεράσματα.....	79
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ – ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Πίνακας 1: Σύνθεση Λιπάσματος 14-14-14 (100% coated)	38
Πίνακας 2: Σύνθεση Λιπάσματος 15-7-15 +2MgO+ME (100%coated)	38
Πίνακας 3. Οι τιμές των παραμέτρων α , β , γ , δ , ε και τα όρια εμπιστοσύνης R^2 της σχέσης (1) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των στοιχείων NH_4 , PO_4 , NO_3 , K σε διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14.	73
Πίνακας 4. Οι τιμές των παραμέτρων α , β , γ , δ , ε και τα όρια εμπιστοσύνης R^2 της σχέσης (1) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των στοιχείων NH_4 , PO_4 , NO_3 , K και αφορά τα διαλύματα που περιέχουν το λίπασμα 15-7-15.	76
Σχήμα 1. Παγκόσμια κατανάλωση CRF και SRF λιπασμάτων κατά το έτος 2014 Πηγή: https://www.ihs.com/products/controlled-and-slow-release-chemical-economics-handbook.html (February 2015).....	30
Σχήμα 2. Ρυθμός απελευθέρωσης θρεπτικών στοιχείων για το “ιδανικό” λίπασμα. Πηγή (Lammel, 2006).	31
Σχήμα 3. Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τον ρυθμό απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων από κόκκους CRF λιπάσματος με επικάλυψη πολυμερούς υλικού. Πηγή: (Shaviv, 2000).	35
Σχήμα 4. Διαδικασία απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων από ένα MulticoTech™ λίπασμα. Πηγή: http://www.haifa-group.com	36
Σχήμα 5. Επίδραση της σταθερής θερμοκρασίας στη σταθερή απελευθέρωση του λιπάσματος σε σχέση με το χρόνο παραμονής του στο έδαφος. Πηγή: http://www.haifa-group.com	36
Διάγραμμα 1. Μεταβολή της τιμής του pH σε σχέση με το χρόνο για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, και τα οποία παρέμειναν χωρίς περαιτέρω ρύθμιση (-----), ή διορθώνονταν συνεχώς στην τιμή 5,5 και παρέμειναν στους 24°C (-----) και στους 18°C (-----).	39
Διάγραμμα 2. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (-----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.	40
Διάγραμμα 3. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (-----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6,5, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6,5, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.	41
Διάγραμμα 4. Μεταβολή της τιμής του pH σε σχέση με το χρόνο για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, και τα οποία παρέμειναν χωρίς περαιτέρω ρύθμιση (-----), ή διορθώνονταν συνεχώς στην τιμή 5,5 και παρέμειναν στους 24°C (-----) και στους 18°C (-----).	42
Διάγραμμα 5. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (-	

-) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C. 43
- Διάγραμμα 6. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (- ----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6,5, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6,5, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C. 44
- Διάγραμμα 7. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (-----) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (-----)σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα , σε αρχικό pH 5,5 παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς 45
- Διάγραμμα 8. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (-----) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (-----) σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα , σε αρχικό pH 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς. 46
- Διάγραμμα 9. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (-----) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (-----)σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα , σε αρχικό pH 6,5 παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς. 47
- Διάγραμμα 10. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO₃ σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 , σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 49
- Διάγραμμα 11. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO₃ σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 , σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (-- ---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 50
- Διάγραμμα 12. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO₃ σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 , σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 51
- Διάγραμμα 13. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO₃ σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 , σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---- -), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 52
- Διάγραμμα 14. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH₄ σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 , σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 55
- Διάγραμμα 15. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH₄ σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 , σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (-- ---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 56

- Διάγραμμα 16. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 57
- Διάγραμμα 17. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6(-----), 6,5(-----) σε θερμοκρασία 24°C. 58
- Διάγραμμα 18. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 60
- Διάγραμμα 19. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 61
- Διάγραμμα 20. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 62
- Διάγραμμα 21. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 63
- Διάγραμμα 22. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 66
- Διάγραμμα 23. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 67
- Διάγραμμα 24. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (-----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά. 68
- Διάγραμμα 25. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C. 69
- Διάγραμμα 26. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NH_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH που ρυθμιζόνταν συνεχώς στην τιμή 5,5. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση. 74

Διάγραμμα 27. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των PO_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	74
Διάγραμμα 28. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NO_3 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	75
Διάγραμμα 29. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης του K, σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	75
Διάγραμμα 30. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NH_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	77
Διάγραμμα 31. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των PO_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	77
Διάγραμμα 32. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NO_3 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	78
Διάγραμμα 33. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης του K, σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.	78

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

1.1.1 Η σημασία της υδροπονίας ως μέθοδος καλλιέργειας στην Ελλάδα

Υδροπονία ή εκτός εδάφους καλλιέργεια, ονομάζεται οποιαδήποτε τεχνική κατά την οποία η ανάπτυξη των φυτών γίνεται εκτός φυσικού εδάφους, με ή χωρίς τη χρήση φυσικού ή τεχνητού μέσου καλλιέργειας (υπόστρωμα) όπου οι συνολικές απαιτήσεις των φυτών σε νερό και θρεπτικά στοιχεία παρέχονται από το σύστημα (Jensen, 1999; Hanger, 1993). Η υδροπονική καλλιέργεια είναι μια εξελιγμένη τεχνική καλλιέργειας, που απαιτεί υψηλό βαθμό εξειδίκευσης και κατά την οποία αποσυνδέεται η ανάπτυξη των φυτών από τη χρήση εδάφους ή εδαφικού μίγματος (Αναστασίου και Παπαγεωργίου, 1999).

Η εφαρμογή της υδροπονίας για την καλλιέργεια των φυτών σε εμπορική κλίμακα παγκοσμίως, ακολούθησε την προσπάθεια τροποποίησης του φυσικού περιβάλλοντος και επίτευξης άριστων συνθηκών ανάπτυξης των φυτών, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής και τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Αυτό οδήγησε τελικά στην ανάπτυξη καλλιεργειών σε απόλυτα ελεγχόμενο περιβάλλον όπως είναι αυτό ενός υδροπονικού θερμοκηπίου (Μαυρογιαννόπουλος, 2006), όπου ελέγχονται όχι μόνο οι παράμετροι του αέριου περιβάλλοντος του φυτού (θερμοκρασία-υγρασία του αέρα και ένταση φωτός) αλλά και οι συνθήκες που επικρατούν στο επίπεδο της ρίζας (pH, αλατότητα, επίπεδα υγρασίας).

Παράλληλα με την εφαρμογή της υδροπονίας δόθηκε η δυνατότητα να καλλιεργηθούν φυτά σε περιοχές με πολύ κακή ποιότητα εδάφους ή νερού όπως επίσης και να περιοριστεί η χρήση χημικών φαρμάκων και ζιζανιοκτόνων, λόγω του περιορισμού των μυκητολογικών προσβολών (ιδιαίτερα όσων προσβάλουν το ριζικό σύστημα των φυτών) και της παντελούς έλλειψης ζιζανίων στα υδροπονικά θερμοκήπια.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του IRTC (International Research and Training Centre for Sustainability), η έκταση των θερμοκηπιακών υδροπονικών καλλιεργειών στην Ελλάδα σήμερα φτάνει περίπου τα 2000 στρέμματα και αφορά λαχανοκομικές (1500 στρ) αλλά και ανθοκομικές καλλιέργειες (500στρ).

Η Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης και των άριστων κλιματικών συνθηκών, ενδείκνυται για την ανάπτυξη θερμοκηπιακών και υπαίθριων υδροπονικών καλλιεργειών, η

σωστή διαχείριση των οποίων έχει πρωταρχική σημασία, για να μπορέσει η χώρα να συμβαδίσει με τους συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς των απαιτήσεων της διεθνούς αγοράς και του ανταγωνισμού. Η σωστή προσαρμογή στην Ελληνική πραγματικότητα των τεχνολογικών δυνατοτήτων που είναι σήμερα διαθέσιμες σε παγκόσμια κλίμακα, αλλά κυρίως η απόκτηση εγχώριας τεχνογνωσίας σε θέματα ανάπτυξης και διαχείρισης των υδροπονικών καλλιεργειών φαίνεται αποτελούν μονόδρομο για την εξέλιξη της υδροπονίας στην Ελλάδα.

1.1.2 Συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών

Το βασικό πλεονέκτημα μιας καλλιέργειας εγκατεστημένης σε ένα υδροπονικό σύστημα, σε σύγκριση με μια συμβατική στο έδαφος, είναι ότι υπό ιδανικές συνθήκες εφαρμόζονται , στο περιβάλλον της ρίζας των φυτών τα βέλτιστα επίπεδα οξυγόνου, νερού και θρεπτικών στοιχείων, που τα φυτά απαιτούν σε κάθε στάδιο της αύξησης και ανάπτυξής τους. Τα στοιχεία αυτά έρχονται να συμπληρώσουν τον έλεγχο του μικροκλίματος που ασκείται στο περιβάλλον μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας, δηλαδή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, της έντασης και της ποιότητας του φωτός καθώς και του επιπέδου του CO₂ (Soladome, 2001). Κατά συνέπεια, σε μια θερμοκηπιακή υδροπονική καλλιέργεια ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό ολόκληρο το σύστημα παραγωγής, με άμεση συνέπεια:

- Την εξοικονόμηση νερού.
- Τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.
- Την αύξηση της παραγωγής.
- Την εξοικονόμηση λιπασμάτων.
- Την ελαχιστοποίηση χρήσης φυτοφαρμάκων.
- Την προστασία του περιβάλλοντος.
- Την δυνατότητα αυτοματοποίηση της παραγωγής.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω στόχων αναπτύχθηκαν πολλά συστήματα υδροπονικών καλλιεργειών, η κατάταξη των οποίων γίνεται με διάφορα κριτήρια.

- I. Κατάταξη με βάση την επαναχρησιμοποίηση ή μη του θρεπτικού διαλύματος. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο υπάρχουν δύο κατηγορίες υδροπονικών συστημάτων τα οποία αποτελούν τους δύο κύριους τύπους εμπορικών συστημάτων (Seymour, 1993) :
 - i. Το Ανοικτό σύστημα κατά το οποίο το απορρέον θρεπτικό διάλυμα μετά την άρδευση της καλλιέργειας απομακρύνεται (συνήθως στο περιβάλλον).

- ii. Το Κλειστό σύστημα κατά το οποίο ένα μέρος ή ολόκληρο το απορρέων θρεπτικό διάλυμα επαναχρησιμοποιείται για την άρδευση της καλλιέργειας.
- II. Με βάση τον τρόπο παροχής του θρεπτικού διαλύματος:
- i. Τα Παθητικά συστήματα, που περιλαμβάνουν :
 - ♦ Το σύστημα φυτιλιού (wick feeding system) κατά το οποίο ο ρυθμός τροφοδοσίας του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά ρυθμίζεται από τον ρυθμό απώλειας του νερού από το υπόστρωμα λόγω της διαπνοής της καλλιέργειας.
 - ♦ Την καλλιέργεια σε θρεπτικό διάλυμα ή με επίπλευση των φυτών (water culture system, float system).
 - ii. Τα Ενεργά συστήματα, που περιλαμβάνουν:
 - ♦ Το σύστημα N.F.T. (Nutrient Film Technique) δηλαδή καλλιέργεια σε θρεπτικό διάλυμα λεπτής στοιβάδας σε κανάλια χωρίς τη χρήση υποστρώματος.
 - ♦ Το σύστημα πλήρωσης και στράγγισης ή ανύψωσης της στάθμης και απορροής (flood and drain or ebb and flow system).
 - ♦ Το σύστημα παροχής του θρεπτικού διαλύματος με σταλάκτη (drip feeding control) και με χρήση υποστρώματος.
 - ♦ Την αεροπονία (aeroponics) όπου το θρεπτικό διάλυμα εφαρμόζεται απ' ευθείας στο ριζικό σύστημα των φυτών (το οποίο αναπτύσσεται σε ειδικό χώρο χωρίς τη χρήση υποστρώματος) με μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων.
- III. Με βάση τη χρήση ή μη υποστρώματος, υπάρχουν τρεις κατηγορίες υδροπονικών συστημάτων :
- i. Τα συστήματα με χρήση υποστρώματος, το οποίο μπορεί να είναι ανόργανο (άμμο, χαλίκι, πετροβάμβακα, περλίτη, βερμικουλίτη, μίγμα περλίτη-βερμικουλίτη, ελαφρόπετρα, διογκωμένη άργιλο, πολυεστερίνη) ή οργανικό (τύρφη, φλοιός κόκκου).
 - ii. Τα συστήματα χωρίς υπόστρωμα ή συστήματα συνεχούς ροής, όπως το NFT.
 - iii. Το σύστημα αεροπονίας.
- IV. Με βάση τον τρόπο συγκράτησης του υποστρώματος, υπάρχουν δύο κατηγορίες υδροπονικών συστημάτων :
- i. Καλλιέργεια σε σάκους ή σε φυτοδοχεία.
 - ii. Καλλιέργεια σε κανάλια υποστρώματος.

1.1.2.1 Ρόλος των υποστρωμάτων στα υδροπονικά συστήματα

Η χρησιμότητα του εδάφους για την καλλιέργεια φυτών εξασφαλίζει την ανόργανη θρέψη τους και παράλληλα τους παρέχει μηχανική στήριξη. Τα υποστρώματα που

χρησιμοποιούνται στην υδροπονία πρέπει να διαθέτουν ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως καλή και ομοιόμορφη δομή, υφή και σύσταση. Είναι επίσης απαραίτητο το υπόστρωμα να έχει υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, δηλαδή να μπορεί να συγκρατεί μεγάλη ποσότητα ιόντων και να μπορεί να τα αποδώσει εύκολα στο ριζόστρωμα μέσω του εδαφικού διαλύματος όταν αυτό βρίσκεται σε συνθήκες ανεπάρκειας.

Στην υδροπονία η επιλογή υποστρωμάτων καθορίζεται από την χρήση υλικών που δεν ρυθμίζουν την διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων και κατά συνέπεια την θρέψη των φυτών. Το υπόστρωμα δεν πρέπει να παίζει ρυθμιστικό ρόλο προσροφώντας θρεπτικά στοιχεία (όπως συμβαίνει με το έδαφος) ώστε να μπορεί να γίνεται πλήρης έλεγχος της θρέψης των φυτών μόνο μέσω της λίπανσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αδρανή υποστρώματα τα οποία δεν συγκρατούν ισχυρά τα ανόργανα ιόντα και δεν αποδίδουν μη επιθυμητά στοιχεία στο θρεπτικό διάλυμα (Σάββας, 1998). Αυτό καθιστά ευκολότερο τον έλεγχο της θρέψης των φυτών σε μια υδροπονική καλλιέργεια, απαιτεί ωστόσο ακριβείς χειρισμούς ώστε να μη δημιουργηθούν συνθήκες έλλειψης ή τοξικότητας στοιχείων στα φυτά, σε αντίθεση με παραδοσιακές καλλιέργειες όπου το σημαντικό ρόλο στην παροχή και στη ρύθμιση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων παίζει το έδαφος. Η ρυθμιστική του ικανότητα οφείλεται στην ανταλλακτική ικανότητα των εδαφικών κλασμάτων, κατά την οποία είναι δυνατή η αποθήκευση μέρους των θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται σε περίσσεια. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να απελευθερωθούν στη συνέχεια σταδιακά, όταν παρατηρηθούν χαμηλές συγκεντρώσεις στο εδαφικό διάλυμα λόγω έκπλυσης ή απορρόφησης από τα φυτά. Έτσι, το έδαφος καθιστά τα φυτά μη εξαρτώμενα από την συχνή εξωτερική χορήγηση θρεπτικών στοιχείων, δημιουργεί ωστόσο κυρίως η ετερογένεια του και τα φυσικοχημικά του χαρακτηριστικά ένα απρόβλεπτο και ελάχιστα ελεγχόμενο περιβάλλον, με σαφείς επιπτώσεις στη θρέψη των φυτών.

Τα υποστρώματα πρέπει να έχουν ομοιόμορφη σύσταση για την συμπεριφορά τους στην θρέψη των φυτών και να είναι απαλλαγμένα από ζωικούς εχθρούς, ζιζάνια και παθογόνα. Πρέπει να έχουν σταθερή δομή για να μην αποσυντίθενται εύκολα και να επιτυγχάνουν ικανοποιητική αναλογία μεταξύ νερού και αέρα όταν βρίσκονται στην κατάσταση της υδατοϊκανότητας. Επιπρόσθετα πρέπει να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και να είναι εύκολα στη χρήση τους και στους καλλιεργητικούς χειρισμούς. Ένα καλό υπόστρωμα μπορεί να είναι αδρανές ή χημικά ενεργό. Στην περίπτωση που το υπόστρωμα είναι χημικά ενεργό θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ανταλλακτική ικανότητα και κατάλληλο pH (Σάββας, 2003).

1.1.3 Εξοπλισμός εγκαταστάσεων για καλλιέργειες εκτός εδάφους

Μια εγκατάσταση καλλιέργειας φυτών εκτός εδάφους από άποψη εξοπλισμού περιλαμβάνει τρία βασικά τμήματα τα οποία υπάρχουν υποχρεωτικά σε όλα τα συστήματα καλλιέργειας αυτού του τύπου:

- α) τις εγκαταστάσεις παρασκευής του θρεπτικού διαλύματος
- β) το σύστημα μεταφοράς και διανομής του θρεπτικού διαλύματος
- γ) τους υποδοχείς των υποστρωμάτων ή του θρεπτικού διαλύματος των φυτών

1.1.4 Εγκαταστάσεις παρασκευής θρεπτικού διαλύματος

Οι συνηθισμένες εγκαταστάσεις παρασκευής θρεπτικού διαλύματος που χρησιμοποιούνται συνήθως στις υδροπονικές καλλιέργειες αποτελούνται από τα εξής μέρη:

α) Εγκατάσταση παροχής νερού που μπορεί να είναι μια γεώτρηση, είτε μία σύνδεση με τοπικό δίκτυο ύδρευσης, κτλ. Το νερό πρέπει να είναι καλής ποιότητας όσον αφορά την περιεκτικότητά του σε άλατα.

β) Δοχεία πυκνών διαλυμάτων χωρητικότητας 50-1000lt ή και μεγαλύτερα. Τα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες εκτός εδάφους χαρακτηρίζονται από υψηλή υδατοδιαλυτότητα προκειμένου να διαλύονται πλήρως μέσα στο νερό που προστίθεται. Τα διαλύματα που προκύπτουν ονομάζονται πυκνά ή μητρικά διαλύματα και περιέχουν 100 ή και 200 φορές περισσότερη ποσότητα λιπάσματος από αυτή που απαιτούν τα φυτά. Πριν αποσταλεί στα φυτά το θρεπτικό διάλυμα αραιώνεται στον επιθυμητό βαθμό, χειρωνακτικά είτε αυτοματοποιημένα, μέσω της κεφαλής υδρολίπανσης.

γ) Κεφαλή υδρολίπανσης. Αποτελεί ένα σύστημα αραίωσης των πυκνών διαλυμάτων με το νερό της άρδευσης το οποίο συνήθως περιλαμβάνει και εξοπλισμό για τον αυτόματο έλεγχο της λειτουργίας της εγκατάστασης καθώς και μια αντλία μεγάλης δυναμικότητας για την αποστολή του διαλύματος στο χώρο της καλλιέργειας. Σε μικρής δυναμικότητας υδροπονικές μονάδες δεν διαθέτουν ειδικές εγκαταστάσεις για αυτόματη αραίωση των πυκνών διαλυμάτων αλλά μια μεγάλη δεξαμενή, μέσα στην οποία παρασκευάζεται απευθείας το τελικό θρεπτικό διάλυμα.

Ωστόσο συνήθης πρακτική πλέον είναι η χρήση μονάδας αυτόματης αραίωσης των πυκνών διαλυμάτων.

Μια εμπορική κεφαλή υδρολίπανσης αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω μέρη :

α) Το υδραυλικό σύστημα μέσω του οποίου αραιώνονται συντονισμένα όλα τα πυκνά διαλύματα συμπεριλαμβανομένου και του οξέος και

β) το ηλεκτρονικό σύστημα αυτόματης διαχείρισης και ελέγχου της λειτουργίας της με βάση προκαθορισμένες οδηγίες.

Το σύστημα αυτόματου ελέγχου (προγραμματιστής) αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του εξοπλισμού όλων των σύγχρονων κεφαλών υδρολίπανσης. Απαραίτητα συστατικά του συστήματος αυτόματου ελέγχου είναι οι αισθητήρες μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και του pH του θρεπτικού διαλύματος που παρασκευάζεται και χορηγείται στην καλλιέργεια. Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν συνεχώς τις αντίστοιχες τιμές στο θρεπτικό διάλυμα κατά τη διάρκεια παρασκευής του και τις διαβιβάζουν άμεσα στο σύστημα αυτόματου ελέγχου. Στις σύγχρονες κεφαλές υπάρχουν δύο αισθητήρες μέτρησης της EC καθώς και 2 αισθητήρες μέτρησης του pH (Van Os et al. 2008), ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος λανθασμένης λειτουργίας τους λόγω απορρύθμισης των αισθητήρων (Σάββας, 2011).

1.1.4.1 Τύποι κεφαλών υδρολίπανσης

Με βάση την αρχή λειτουργίας τους μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

α) κεφαλές υδρολίπανσης που εισάγουν τα πυκνά διαλύματα απευθείας στον αγωγό άρδευσης σε προκαθορισμένη αναλογία με το νερό.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζεται κατά τη λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου κεφαλής είναι η διακύμανση της αραίωσης των πυκνών διαλυμάτων με το νερό της παροχής όταν η πίεση ή η παροχή του τελευταίου δεν είναι σταθερή. Κατά συνέπεια, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που στέλνεται στα φυτά μπορεί να αποκλίνει από τις επιθυμητές τιμές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, αναπτύχθηκαν εμπορικές κεφαλές υδρολίπανσης, αποτελούμενες από δοσομετρικές αντλίες, των οποίων η παροχή ρυθμίζεται μέσω ενός κεντρικού συστήματος αυτόματου ελέγχου (Papadopoulos & Liburdi, 1989).

β) κεφαλές υδρολίπανσης που εισάγουν τα πυκνά διαλύματα και το νερό σε έναν κάδο ανάμειξης σε προκαθορισμένη αναλογία.

Για μεγάλες θερμοκηπιακές μονάδες τόσο ο χώρος όσο και ο χρόνος λειτουργίας της κεφαλής υδρολίπανσης αποτελούν πρωταρχικής σημασίας κριτήρια για την αξιολόγηση και την επιλογή της. Το μειονέκτημα αυτών των κεφαλών είναι ότι απαιτούν σχετικά μεγάλο χώρο για την τοποθέτηση του κάδου ανάμειξης, του οποίου η χωρητικότητα πρέπει να είναι της τάξης του 1m³ τουλάχιστον. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν περισσότερο χρόνο για να παρασκευάσουν μια συγκεκριμένη ποσότητα θρεπτικού διαλύματος σε σύγκριση με άλλες

κεφαλές. Αυτό προκύπτει διότι αυτές οι κεφαλές πρώτα παρασκευάζουν το θρεπτικό διάλυμα και μετά το διοχετεύουν στην καλλιέργεια (Σάββας, 2011).

γ) κεφαλές υδρολίπανσης που εισάγουν τα πυκνά διαλύματα απευθείας στον αγωγό άρδευσης σε αναλογία που οδηγεί στην επίτευξη προκαθορισμένων τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και pH στο διάλυμα που προκύπτει.

Το μειονέκτημα αυτών των κεφαλών είναι ότι η ακρίβεια στην επίτευξη των τιμών EC και pH που θέτονται ως στόχοι επηρεάζεται από την έκταση της καλλιέργειας που τροφοδοτούν. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η ύπαρξη ενός αρχικού χρόνου υστέρησης μέχρι το σύστημα Venturi που εισάγει πυκνά διαλύματα στον αγωγό άρδευσης να επιτύχει τις ακριβείς αναλογίες που οδηγούν στην επίτευξη των επιθυμητών τιμών EC και pH. Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζει η απευθείας έγχυση των πυκνών διαλυμάτων στον αγωγό άρδευσης είναι η μειωμένη αξιοπιστία της ρύθμισης του pH (Stradiot, 2005). Αυτό το πρόβλημα οφείλεται κυρίως σε διακυμάνσεις της παροχής νερού μέσω του δικτύου άρδευσης.

δ) κεφαλές υδρολίπανσης που εισάγουν τα πυκνά διαλύματα και το νερό σε έναν κάδο ανάμειξης σε αναλογία που οδηγεί στην επίτευξη προκαθορισμένων τιμών EC και pH στο διάλυμα που προκύπτει. Οι κεφαλές αυτού του τύπου θεωρούνται οι πιο αξιόπιστες και αποτελεσματικές γι' αυτό και είναι οι πλέον διαδεδομένες διεθνώς (Stradiot, 2005).

Η κεφαλή υδρολίπανσης μπορεί να κοστίσει από 3.000, 4.000 μέχρι και 20.000€, ανάλογα με τις απαιτήσεις τις μονάδας και τις δυνατότητες που υποστηρίζει. Για παράδειγμα, στα φθηνότερα συστήματα υποστηρίζεται μόνο χρονικός προγραμματισμός των αρδεύσεων, ενώ τα πιο εξελιγμένα υποστηρίζουν άρδευση βάση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της υγρασίας του υποστρώματος, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος κ.α. Τέλος, υπάρχουν μηχανήματα που εκτός από την υδρολίπανση υποστηρίζουν και έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου. Στο κόστος της κεφαλής υδρολίπανσης θα πρέπει να προστεθεί και αυτό της αντλίας (ανοξείδωτη) παροχής του θρεπτικού διαλύματος καθώς και των πλαστικών δεξαμενών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των πυκνών διαλυμάτων, του οξέος ή της βάσης για τη ρύθμιση του pH και για παρασκευή του τελικού διαλύματος που θα διατεθεί στην καλλιέργεια., το οποίο μπορεί να είναι κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000€. Μία κεφαλή μπορεί να εξυπηρετεί από λίγα, μέχρι και δεκάδες στρέμματα, οπότε ο παραγωγός, κατά κανόνα, δεν επιβαρύνεται με το κοστολόγιο αυτό όταν πραγματοποιεί μία επέκταση του συστήματος.

Στα περισσότερα υδροπονικά θερμοκήπια, το σύστημα αυτόματου ελέγχου της κεφαλής υδρολίπανσης είναι συνδεδεμένο με αισθητήρες μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων, όπως

της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της σχετικής υγρασίας, της θερμοκρασίας του αέρα και της υγρασίας του υποστρώματος (Van Os et al., 2008; Klaring, 2001).

1.1.5 Παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος

Ο Hansen (1978) αναφέρει ότι η προσθήκη θρεπτικών συστατικών σε υδροπονικά συστήματα μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την απαίτηση των φυτών σε θρεπτικά συστατικά. Έτσι, η σύνθεση και η συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος εξαρτώνται από το σύστημα καλλιέργειας, το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Coic, 1973; Steiner, 1973).

Ομοίως, ο Steiner (1968) πρότεινε ότι σε καλλιέργειες εκτός εδάφους μπορεί να δοθεί οποιαδήποτε ιοντική αναλογία και όποια συνολική συγκέντρωση ιόντων. Έτσι η συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων σε ένα θρεπτικό διάλυμα, καθορίζεται κυρίως από τη δυνατότητα να απορροφηθούν από τα φυτά με μια επιθυμητή αναλογία, η οποία εξαρτάται άμεσα από τη διαπνευστική δραστηριότητα του φυτού και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας όπως το είδος του φυτού, το στάδιο ανάπτυξης και την εποχή καλλιέργειας.

Ο Steiner (1961) ανέπτυξε μια μέθοδο για να υπολογίσει μια φόρμουλα για τη σύνθεση ενός θρεπτικού διαλύματος, το οποίο πληροί ορισμένες προϋποθέσεις. Αργότερα ο ίδιος αξιολόγησε τον συνδυασμό πέντε διαφορετικών αναλογιών ανιόντων ($\text{NO}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4 + \text{SO}_4$) και τριών κατιόντων (K, Ca, Mg), με αποτέλεσμα έναν πολυπαραγοντικό σχεδιασμό. Όλα τα διαλύματα είχαν την ίδια οσμωτική πίεση και τιμή pH. Σε αυτό το σύστημα, η σχετική συγκέντρωση του K αυξάνει σε βάρος των συγκεντρώσεων Ca και Mg. Επιπλέον, η αναλογία 3:1 μεταξύ Ca και Mg είναι σταθερή. Ομοίως, ο λόγος $\text{H}_2\text{PO}_4 : \text{SO}_4$ (1 : 9) είναι σταθερός, ενώ οι μεταβολές της συγκέντρωσης NO_3 γίνονται συναρτήσει των συγκεντρώσεων H_2PO_4 και SO_4 (Steiner, 1966).

1.1.6 Σύνθεση και διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος

Το θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται στις καλλιέργειες εκτός εδάφους είναι ένα υδατικό διάλυμα το οποίο περιέχει κυρίως ανόργανα ιόντα βασικών θρεπτικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των ανώτερων φυτών. Ένα βασικό θρεπτικό στοιχείο έχει σαφή φυσιολογικό ρόλο και η απουσία του δεν επιτρέπει τον πλήρη κύκλο ζωής των φυτών (Taiz & Zeiger, 1998). Ενδεχομένως στο θρεπτικό διάλυμα εκτός από άλατα να περιέχονται και μερικές οργανικές ενώσεις, όπως χηλικού σιδήρου (Steiner, 1968).

Τα απαραίτητα στοιχεία για τα περισσότερα φυτά είναι 17 και είναι τα εξής: ο άνθρακας, το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το θείο, ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το βόριο, το χλώριο και το νικέλιο (Salisbury & Ross, 1994). Με την εξαίρεση του άνθρακα (C) και του οξυγόνου (O), τα οποία παρέχονται από την ατμόσφαιρα, τα υπόλοιπα στοιχεία λαμβάνονται από το μέσο ανάπτυξης. Άλλα στοιχεία όπως το νάτριο, το πυρίτιο, βανάδιο, σελήνιο, κοβάλτιο, αργίλιο και ιώδιο, μεταξύ άλλων, θεωρούνται επωφελή επειδή ορισμένα από αυτά μπορούν να τονώσουν την ανάπτυξη των φυτών, να αντισταθμίσουν τις τοξικές επιδράσεις άλλων στοιχείων, ή να αντικαταστήσουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά (Trejo-Tellez et al., 2007). Τα βασικά στοιχεία του θρεπτικού διαλύματος τα οποία συμπληρώνονται με τα απαραίτητα ιχνοστοιχεία όμως είναι το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το θείο.

Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος προσδιορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το οσμωτικό δυναμικό του διαλύματος. Για το λόγο αυτό η επίτευξη μιας συγκεκριμένης τελικής τιμής EC στο διάλυμα που τροφοδοτεί την καλλιέργεια, με τη χρήση πυκνών μητρικών διαλυμάτων προκαθορισμένης σύνθεσης, αποτελεί έναν εύκολο τρόπο παρασκευής θρεπτικού διαλύματος.

Η αποτελεσματική χρήση νερού στις εκτός εδάφους καλλιέργειες είναι απαραίτητη για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Έτσι, στα φυτά παρέχεται θρεπτικό διάλυμα με συγκεκριμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία καθορίζεται κάθε φορά σύμφωνα με το στάδιο καλλιέργειας και την ποσότητα των θρεπτικών που διοχετεύονται στα φυτά σύμφωνα με τις ανάγκες τους (Kinoshita et al, 2014).

Η αντίδραση των φυτών σε ένα θρεπτικό διάλυμα καθορίζεται κυρίως από τη συνολική συγκέντρωση αλάτων, το pH και τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων (Steiner, 1961; De Rijck & Schrevens, 1997). Ως εκ τούτου, οι συστάσεις που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος αναφέρονται σε αυτά τα χαρακτηριστικά. Η συνολική συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα των υδροπονικών καλλιεργειών είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά. Πολύ υψηλά επίπεδα προκαλούν τοξικότητα αλατότητας, ενώ πολύ χαμηλές τιμές ως επί το πλείστον συνοδεύονται από ελλείψεις θρεπτικών συστατικών (Sonneveld, 1989). Για το λόγο αυτό έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για τον καθορισμό βέλτιστης συνολικής ιοντικής συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα για συγκεκριμένες καλλιέργειες (Moustafa & Morgan, 1983; Ehretand, 1986; Sonneveld & Welles, 1988; Holder & Christensen, 1988; Adams, 1991; Savvas, 1992; Sonneveld & Voogt, 1993). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η EC χρησιμοποιήθηκε ως εκτίμηση για τη συνολική ιοντική συγκέντρωση, δεδομένου ότι μπορεί να μετρηθεί εύκολα και

με ακρίβεια ακόμη και σε εμπορικά θερμοκήπια, χρησιμοποιώντας φορητά όργανα (Cooper, 1977).

Το pH ενός θρεπτικού διαλύματος παίζει επίσης πολύ μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών, καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των περισσότερων θρεπτικών στοιχείων (Islam et al, 1980; Willumsen, 1980) και θα πρέπει, ως εκ τούτου, να διατηρείται εντός συγκεκριμένων ορίων. Όπως προτείνεται από τον Jones (1982), τα θρεπτικά διαλύματα που παρέχονται στις εκτός εδάφους καλλιέργειες θα πρέπει να έχουν ένα pH μεταξύ 5-6 (συνήθως 5,5), προκειμένου να διατηρηθεί ένα pH μεταξύ 6-6,5 στο περιβάλλον της ρίζας. Το pH του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζεται από την ιοντική του σύνθεση (Steiner, 1961; De Rijck & Schrevens, 1997a, 1997b). Ως εκ τούτου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το pH στόχος ενός θρεπτικού διαλύματος, όταν διαμορφώνεται η ιοντική του σύνθεση.

1.1.6.1 Ποιότητα νερού

Η ανάλυση του νερού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή ενός θρεπτικού διαλύματος θα πρέπει να είναι ακριβής, τα αποτελέσματα της οποίας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον καθορισμό των τιμών-στόχων της EC και των συγκεντρώσεων των θρεπτικών (Savvas D.; Adamidis C., 1999).

Μια επαρκής παροχή νερού καλής ποιότητας είναι απαραίτητη, ειδικά για την παραγωγή των καλλιεργειών εκτός εδάφους. Πιθανές πηγές νερού περιλαμβάνουν το νερό της βροχής, τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Η ποιότητα του νερού άρδευσης συνήθως αξιολογείται μέσω της εξέτασης των διαλυμένων μετάλλων και των αλάτων στο νερό. Η αλατότητα συνήθως μετράται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και είναι γνωστό ότι το νερό με υψηλή αλατότητα ($EC > 2 \text{ Ms/cm}$) μπορεί να οδηγήσει σε καταστολή της ανάπτυξης για πολλά φυτά (Van Os et al., 2008).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του νερού άρδευσης προέρχεται από το συνδυασμό των διαλυμένων υλικών στο νερό τροφοδοσίας και των λιπασμάτων που πιθανώς είναι διαλυμένα στο νερό. Είναι επιθυμητό για την παροχή νερού να έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μικρότερη από 0.5 mS cm^{-1} και η συγκέντρωση νατρίου να είναι μικρότερη από 0.5 mmol l^{-1} (Sonneveld, 2000) ώστε να είναι δυνατή στη συνέχεια η προσθήκη λιπασμάτων.

1.1.6.2 Χαρακτηριστικά θρεπτικού διαλύματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα θρεπτικά διαλύματα συνήθως περιέχουν έξι απαραίτητα θρεπτικά συστατικά: N, P, S, K, Ca και Mg. Με αυτόν τον τρόπο ο Steiner

(1961,1968) δημιούργησε την έννοια της ιοντικής αμοιβαίας αναλογίας η οποία βασίζεται στην αμοιβαία αναλογία ανιόντων: NO_3 , H_2PO_4 και SO_4 , και κατιόντων K, Ca, Mg. Η σχέση αυτή δεν περιορίζεται στα συγκεκριμένα ιόντα αλλά στο σύνολο των κατιόντων και των ανιόντων του διαλύματος (Steiner,1961,1968).

Με τον τρόπο αυτό, ο περιορισμός της ιοντικής ισορροπίας καθιστά αδύνατη την εισαγωγή ενός ιόντος στο θρεπτικό διάλυμα χωρίς την ταυτόχρονη εισαγωγή ενός άλλου με αντίθετο φορτίο. Κατά τον ίδιο τρόπο, μια μεταβολή στη συγκέντρωση ενός ιόντος πρέπει να συνοδεύεται είτε από μια αντίστοιχη αλλαγή ενός ιόντος με αντίθετο φορτίο, από μια συμπληρωματική αλλαγή για άλλα ιόντα του ίδιου φορτίου, ή και τα δύο (Hewitt, 1966).

1.1.6.2.1 Το pH του θρεπτικού διαλύματος

Το pH είναι μια παράμετρος εκτίμησης της οξύτητας ή της αλκαλικότητας του διαλύματος. Αυτή η τιμή δείχνει τη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης ελεύθερων ιόντων H^+ και OH^- που υπάρχουν σε ένα διάλυμα και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 14. Ομοίως, η αλλαγή του pH ενός θρεπτικού διαλύματος επηρεάζει τη σύνθεσή του, την βιοδιαθεσιμότητα των στοιχείων που περιέχει και την κατανομή των στοιχείων μεταξύ των διαφόρων χημικών και φυσικών μορφών τους, όπως: ελεύθερα ιόντα, διαλυτά σύμπλοκα, χηλικές μορφές, ζεύγη ιόντων, στερεές και αέριες φάσεις και διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης (De Rijck & Schrevens, 1998a).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των θρεπτικών διαλυμάτων είναι ότι πρέπει να περιέχουν τα ιόντα στο διάλυμα και σε χημικές μορφές που να μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Έτσι, σε υδροπονικά συστήματα η παραγωγικότητα των φυτών είναι στενά συνδεδεμένη με την πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών και τη ρύθμιση του pH (Marschner, 1995). Κάθε θρεπτικό δείχνει διαφορετική απόκριση σε αλλαγές στο pH του θρεπτικού διαλύματος (De Rijck & Schrevens, 1999).

1.1.6.2.2 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος

Η συνολική ιοντική συγκέντρωση ενός θρεπτικού διαλύματος καθορίζει την αύξηση, την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών (Steiner, 1961). Η συνολική ποσότητα των ιόντων των διαλυμένων αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα ασκεί μια δύναμη που ονομάζεται οσμωτική πίεση, η οποία είναι μια ιδιότητα των θρεπτικών διαλυμάτων και εξαρτάται σαφώς από την ποσότητα των διαλυμένων ουσιών (Landowne, 2006). Επίσης, οι όροι διαλυμένη ουσία, δυναμικό ή οσμωτικό δυναμικό χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του

θρεπτικού διαλύματος, το οποίο αντιπροσωπεύει την επίδραση των διαλυμένων διαλυτών ουσιών στο υδατικό δυναμικό, καθώς οι διαλυμένες ουσίες μειώνουν την ελεύθερη ενέργεια του νερού (Taiz & Zeiger, 1998). Ένας έμμεσος τρόπος για να εκτιμηθεί η οσμωτική πίεση του θρεπτικού διαλύματος είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), δηλαδή ο δείκτης της συγκέντρωσης άλατος που καθορίζει το συνολικό ποσό των αλάτων σε ένα διάλυμα. Ως εκ τούτου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του θρεπτικού διαλύματος είναι ένας καλός δείκτης της ποσότητας των διαθέσιμων ιόντων στα φυτά στη ζώνη της ρίζας (Nemali & van Iersel, 2004). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) είναι συγκεκριμένη για κάθε καλλιέργεια και εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (Sonneveld & Voogt, 2009). Ωστόσο, οι τιμές της για υδροπονικά συστήματα κυμαίνονται από 1,5 έως 2,5 ds m⁻¹.

1.1.6.2.3 Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος

Οι καλλιέργειες εκτός εδάφους επιτρέπουν έναν πιο ακριβή έλεγχο των συνθηκών που επικρατούν στο επίπεδο της ρίζας των φυτών προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της παραγωγής και βελτίωση της ποιότητας των καλλιεργειών. Ειδικότερα, επιτρέπουν την καλύτερη ρύθμιση της θερμοκρασίας του θρεπτικού διαλύματος, το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και επιτρέπουν την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος παραγωγής.

Όταν ένα θρεπτικό διάλυμα εφαρμόζεται συνεχώς, τα φυτά μπορούν να προσλάβουν ιόντα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Έτσι, έχει αναφερθεί ότι ένα υψηλό ποσοστό από τα θρεπτικά συστατικά δεν χρησιμοποιούνται από τα φυτά ή η πρόσληψή τους δεν επηρεάζει την παραγωγή. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι στο ανθούριο το 60% των θρεπτικών ουσιών χάνονται με απορροή (Dufour & Guérin, 2005), αλλά σε κλειστά συστήματα η απώλεια των θρεπτικών ουσιών από το περιβάλλον της ρίζας έχει φτάσει στο ελάχιστο (Voogt, 2002). Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να μειωθεί κατά 50%, χωρίς καμία δυσμενή επίδραση στην παραγωγή βιομάζας και στην ποιότητα της ζέρμπερας (Zheng et al., 2005) και του γερανιού (Rouphael et al., 2008). Οι Siddiqi et al. (1998) ανέφεραν ότι δεν υπάρχει καμία δυσμενή επίδραση στην ανάπτυξη, την απόδοση καρπών και την ποιότητα των καρπών τομάτας, όταν υπήρξε μείωση των μακροθρεπτικών συστατικών στο 50% των συγκεντρώσεων του επιπέδου ελέγχου.

Από την άλλη πλευρά, τα θρεπτικά διαλύματα με υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε υπερβολική πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών και ως εκ τούτου μπορεί να προκληθούν τοξικές αντιδράσεις. Υπάρχουν ωστόσο και αποδεικτικά στοιχεία των θετικών αποτελεσμάτων στις υψηλές συγκεντρώσεις του θρεπτικού διαλύματος.

Ο Voogt (2002) δείχνει ότι η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος πρέπει να αντανακλά τις αναλογίες πρόσληψης των επιμέρους στοιχείων από την καλλιέργεια. Καθώς η ζήτηση μεταξύ ειδών διαφέρει, η βασική σύνθεση ενός θρεπτικού διαλύματος είναι συγκεκριμένη για κάθε καλλιέργεια. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ανάλογα με το είδος του συστήματος που χρησιμοποιείται (ανοιχτό ή κλειστό) διαφέρει ο βαθμός που απορροφάται από την καλλιέργεια. Για παράδειγμα, στα ανοιχτά συστήματα με ελεύθερη αποστράγγιση μεγάλο μέρος του θρεπτικού διαλύματος χάνεται κατά την έκπλυση.

1.1.6.2.4 Ρύθμιση του pH.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τιμή του pH καθορίζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Κατά συνέπεια, η ρύθμιση του pH πρέπει να γίνεται καθημερινά λόγω της μικρής ρυθμιστικής ικανότητας των υδροπονικών συστημάτων σε σχέση με το έδαφος (Urrestarazu, 2004). Όταν τα ανιόντα προσλαμβάνονται εκλεκτικά σε υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα κατιόντα, για παράδειγμα τα νιτρικά, αυξάνεται η συγκέντρωση OH^- ή HCO_3^- στο θρεπτικό διάλυμα, για την εξισορρόπηση των ηλεκτρικών φορτίων, με αποτέλεσμα την αύξηση στην τιμή του pH. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται φυσιολογική αλκαλικότητα (Marschner, 1995).

Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των αμμωνιακών ως πηγή αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα ρυθμίζει το pH και επομένως διασφαλίζεται η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών. Οι Breteler & Smit (1974) ανέφεραν ότι τα αμμωνιακά μπορούν να προκαλέσουν μείωση της τιμής του pH του θρεπτικού διαλύματος, ακόμη και με την παρουσία νιτρικών. Σε φυτά τριαντάφυλλου η προσθήκη αμμωνιακών σε ένα θρεπτικό διάλυμα που περιέχει νιτρικά, προκάλεσε μια αύξηση της πρόσληψης του αζώτου κατά τη διάρκεια της επιμήκυνσης και αύξησε τη συγκέντρωση του P στις ρίζες (Lorenzo et al., 2000). Η αναλογία του ολικού αζώτου που προστίθεται στο θρεπτικό διάλυμα σε μορφή αμμωνιακών εξαρτάται από την καλλιέργεια.

Από άλλη πλευρά, η χημική ρύθμιση που χρησιμοποιείται ευρέως είναι η προσθήκη οξέων για τη μείωση της τιμής του pH. Το pH είναι στενά συνδεδεμένο με τη συγκέντρωση του HCO_3 και CO_3 . Όταν εφαρμόζεται ένα οξύ, το CO_3 ιόν μετατρέπεται σε HCO_3 , και στη συνέχεια το HCO_3 μετατρέπεται σε H_2CO_3 . Το ανθρακικό οξύ μπορεί μερικώς να διαχωριστεί σε H_2O και CO_2 (De Rijck & Schrevens, 1997). Η ρύθμιση του pH διεξάγεται κανονικά χρησιμοποιώντας νιτρικό, θειικό ή φωσφορικό οξύ, ενώ τέτοια οξέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό.

1.1.6.2.5 Διαχείριση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) τροποποιείται καθώς τα φυτά απορροφούν θρεπτικά συστατικά και νερό από το θρεπτικό διάλυμα σε διαφορετική αναλογία. Ως εκ τούτου, μείωση στην συγκέντρωση κάποιων ιόντων προκαλεί ταυτόχρονα αύξηση της συγκέντρωσης κάποιων άλλων, τόσο σε κλειστά όσο και σε ανοιχτά συστήματα. Για παράδειγμα, σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα με καλλιέργεια τριαντάφυλλου, παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση του Fe στο θρεπτικό διάλυμα μειώθηκε πολύ γρήγορα, ενώ εκείνη του Ca, Mg και Cl αυξήθηκε, ενώ οι συγκεντρώσεις του K, Ca και SO₄ δεν έφτασαν τα κρίσιμα επίπεδα (Lykas et al., 2001). Αντίθετα, σε ένα ανοικτό σύστημα, μια αύξηση της EC μπορεί να προκληθεί από την υψηλή συσσώρευση ορισμένων ιόντων, όπως διττανθρακικά, θειικά και χλωριούχα (Zekki et al., 1996).

Η ικανότητα των υποστρωμάτων να συγκρατούν τα ιόντα συμβάλει κατά συνέπεια στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος που τα διαβρέχει. Προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της συσσώρευσης αλάτων στα υποστρώματα, η ελεγχόμενη έκπλυση με νερό καλής ποιότητας είναι μια εναλλακτική λύση (Ansorena, 2004). Η χρήση προστατευτικού στρώματος στο υπόστρωμα με φύλλο πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλένιο μειώνει την κατανάλωση νερού, αυξάνει την υπολογιζόμενη αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού και μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υποστρώματος. Επομένως το προστατευτικό στρώμα είναι μια καλή εναλλακτική λύση για τον έλεγχο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Farina et al., 2003).

Οι Carmassi et al. (2003) ανέπτυξαν ένα απλό μοντέλο για τις αλλαγές στην συγκέντρωση ιόντων και την ηλεκτρική αγωγιμότητα σε ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα κλειστού υδροπονικού συστήματος που βασίζεται στην πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά.

1.1.6.2.6 Έλεγχος θερμοκρασίας θρεπτικού διαλύματος

Η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος έχει άμεση σχέση με την ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται από τα φυτά και μια αντίστροφη σχέση με το οξυγόνο που διαλύεται σε αυτό. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης τη διαλυτότητα του λιπάσματος και την ικανότητα της πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων από τις ρίζες των φυτών. Είναι συνεπώς προφανής η σημασία ελέγχου της θερμοκρασίας του θρεπτικού διαλύματος, ειδικά σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Κάθε είδος φυτού έχει μια ελάχιστη, βέλτιστη και μέγιστη θερμοκρασία για την ανάπτυξη του, η οποία απαιτεί την λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης ενώ επηρεάζει και τη θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος.

Το επιδαπέδιο σύστημα θέρμανσης χρησιμοποιείται πολλές φορές και για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του θρεπτικού διαλύματος.

1.1.6.2.7 Η οξυγόνωση του θρεπτικού διαλύματος

Η κατανάλωση O_2 αυξάνεται όταν η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος αυξάνει πάρα πολύ. Κατά συνέπεια, προκαλεί μια αύξηση στην σχετική συγκέντρωση του CO_2 στο περιβάλλον της ρίζας εάν στη ρίζα ο αερισμός δεν είναι επαρκής (Morard & Silvestre, 1996).

Η συγκέντρωση του οξυγόνου στο θρεπτικό διάλυμα εξαρτάται επίσης από το ρυθμό κατανάλωσης από τα φυτά, που είναι υψηλότερος όταν η φωτοσυνθετική δραστηριότητα αυξάνεται (Papadopoulos et al., 1999). Μια μείωση κάτω από 3 ή 4 mg/L του διαλυμένου οξυγόνου στο θρεπτικό διάλυμα, αναστέλλει την ανάπτυξη της ρίζας και προκαλεί έναν καφέ μεταχρωματισμό των ριζικών τριχιδίων, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως το πρώτο σύμπτωμα της έλλειψης οξυγόνου (Gislerød & Kempton, 1983).

Παρ' όλα αυτά υποστρώματα, μετά από μακρές περιόδους καλλιέργειας, συνήθως παρουσιάζουν αύξηση της οργανικής ουσίας και της δραστηριότητας των μικροοργανισμών, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση του ανταγωνισμού για το οξυγόνο στο περιβάλλον της ρίζας. Επιπλέον, το ίδιο το ριζικό σύστημα των φυτών τροποποιεί το πορώδες του υποστρώματος και μεταβάλλει την αναλογία νερού και αέρα που αυτό μπορεί να συγκρατήσει, με άμεση επίπτωση στη διαθεσιμότητα του οξυγόνου στα φυτά, τη διάχυση και την παροχή οξυγόνου (Bonachela et al., 2010).

1.2 Θρέψη –απορρόφηση

1.2.1 Αρχές διαχείρισης της θρέψης των φυτών σε υδροπονική καλλιέργεια

Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους, λόγω του περιορισμένου όγκου του υποστρώματος, μπορεί να αποθηκευτεί μόνο ένα μικρό μέρος των θρεπτικών στοιχείων που θα χρειαστούν τα φυτά κατά τη διάρκεια του καλλιεργητικού τους κύκλου. Ωστόσο, μπορεί να ρυθμιστούν ταχύτητα οι συγκεντρώσεις τους μέσω της παροχής του θρεπτικού διαλύματος όταν αυτό έχει την κατάλληλη σύσταση (Σάββας, 2011).

Το θρεπτικό διάλυμα που περιβάλλει τις ρίζες των φυτών μεταβάλλει τη σύστασή του στα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ποτισμάτων (Sonneveld & Voogt, 2009). Βέβαια αυτό συνεπάγεται ότι τυχόν ανισορροπίες στο θρεπτικό διάλυμα έχει σαν αποτέλεσμα ανισορροπίες θρέψης των φυτών. Είναι προφανές λοιπόν, η σπουδαιότητα της σύστασης του θρεπτικού διαλύματος για τις καλλιέργειες εκτός εδάφους και κατά συνέπεια η επιτυχής διαχείριση της θρέψης εξαρτάται απόλυτα από τη σύσταση του διαλύματος που περιβάλλει τις ρίζες (θρεπτικό διάλυμα του ριζοστρώματος), χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η σύσταση του τελευταίου είναι η ίδια με αυτή του διαλύματος που χορηγείται στην καλλιέργεια (θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας).

Η διαφορετική σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος στο επίπεδο της ρίζας των φυτών (σε σχέση με αυτό που παρέχεται με την άρδευση της καλλιέργειας) προκύπτει τόσο από τον διαφορετικό ρυθμό απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων, όσο και από τις ανταγωνιστικές επιδράσεις μεταξύ των ίδιων των στοιχείων που περιορίζουν την απορρόφηση κάποιων ιόντων υπέρ των άλλων. Παραδείγματα της ενισχυμένης πρόσληψης είναι η πρόσληψη του καλίου (K) η οποία ευνοείται έναντι ασβεστίου (Ca) και του μαγνησίου (Mg), καθώς και η πρόσληψη του χλωρίου (Cl), των θεικών (SO₄) και των φωσφορικών (H₂PO₄), η οποία φαίνεται να ευνοείται όταν η πρόσληψη των νιτρικών (NO₃) είναι έντονα μειωμένη.

Ο ρυθμός απορρόφησης είναι επίσης διαφορετικός μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων. Τα στοιχεία K, Cl, NO₃ απορροφώνται πιο εύκολα από τις ρίζες σε σχέση με τα Ca, Mg, SO₄. Η μεγάλη συγκέντρωση NO₃, ως κύρια πηγή N στο θρεπτικό διάλυμα, εντείνει την πρόσληψη των K, Ca, και Mg ενώ αντίθετα αν αυξηθεί η συγκέντρωση των NH₄ ώστε να αποτελέσουν αυτά την κύρια πηγή του N, τότε περιορίζει την πρόσληψη K, Ca, και Mg και ενισχύει την πρόσληψη των NO₃. Επίσης έχει βρεθεί ότι αν τα ιόντα Cl είναι παρόντα σε αρκετά μεγάλες συγκεντρώσεις, τότε η πρόσληψη των NO₃ μειώνεται. Αυτά τα αποτελέσματα του ανταγωνισμού και της συνέργειας των ιόντων έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδροπονία, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος της δημιουργίας στοιχειακών ανισορροπιών στο

θρεπτικό διάλυμα, που με τη σειρά τους να επηρεάσουν την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Ως εκ τούτου, το θρεπτικό διάλυμα πρέπει να είναι σωστά και προσεκτικά ισορροπημένο αρχικά, ενώ στη συνέχεια να διατηρείται σε ισορροπία. Ανισορροπίες που προκύπτουν από αυτές τις επιδράσεις ιόντων θα επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών.

Αν και βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός θρεπτικού διαλύματος προσαρμοσμένου στις ανάγκες της καλλιέργειας αποτελεί η ανάλυση των διαφόρων φυτικών οργάνων, ωστόσο το περιεχόμενο των φυτικών ιστών σε θρεπτικά στοιχεία ποικίλλει σημαντικά με το είδος, το μέρος του φυτού και το στάδιο της ανάπτυξης, καθώς και τη διαθεσιμότητα του στοιχείου. Τα δεδομένα ως προς το περιεχόμενο των φυτικών ιστών σε θρεπτικά στοιχεία βασίζεται ως επί το πλείστον σε προσδιορισμούς επί του ξηρού βάρους. Ωστόσο ένα στοιχείο δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφα κατανομημένο μεταξύ των διαφόρων τμημάτων των φυτών (ρίζες, βλαστούς, μίσχοι και τα φύλλα), ενώ μπορεί επίσης να υπάρξει και άνιση κατανομή μέσα σε ένα φύλλο, όπως και μεταξύ φύλλων σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Γνωρίζοντας τη συγκέντρωση ενός στοιχείου σε ένα συγκεκριμένο σημείο του φυτού σε συγκεκριμένο στάδιο της ανάπτυξης, ακόμη και την παρουσία του σε διαφορετικά σημεία μέσα στο ίδιο το φυτό, εξάγουμε πολύτιμες πληροφορίες για τη θρεπτική κατάσταση του φυτού.

Αν και τα φυσικά χαρακτηριστικά της ίδιας της ρίζας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη πρόσληψη των θρεπτικών, ωστόσο το υπόστρωμα και τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχονται σε αυτό καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την μορφολογία και την λειτουργία της. Για παράδειγμα, τα ριζικά τριχίδια θα είναι ελάχιστα στις ρίζες που εκτίθενται σε υψηλή συγκέντρωση NO_3 (100 mg/L). Υψηλή συγκέντρωση P στο υπόστρωμα θα μειώσει επίσης την ανάπτυξη ριζικών τριχιδίων, ενώ η αλλαγή στις συγκεντρώσεις του K, Ca, και Mg, θα έχουν μόνο μια μικρή επίδραση στην ανάπτυξή τους. Τα ριζικά τριχίδια αυξάνουν σημαντικά τη διαθέσιμη επιφάνεια για την απορρόφηση ιόντων και επίσης αυξάνουν την επιφάνεια επαφής μεταξύ των ριζών και του νερού γύρω από τα σωματίδια στο υπόστρωμα. Ως εκ τούτου, ο αριθμός και το μέγεθός τους μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο νερό και στην πρόσληψη των ιόντων.

1.2.2 Έλεγχος των τριών βασικών στοιχείων (N, P, K) σε υδροπονικές καλλιέργειες

1.2.2.1 Άζωτο (N)

Στα περισσότερα συστήματα εκτός εδάφους καλλιέργειας, ο έλεγχος του N σχετίζεται τόσο με τη συγκέντρωση όσο και με τη μορφή του στοιχείου στο θρεπτικό διάλυμα. Οι περισσότεροι τύποι θρεπτικού διαλύματος χρειάζονται μια ισορροπία μεταξύ των δύο ιοντικών μορφών του N, NO_3 και NH_4 , το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει το pH. Αν τα NO_3 είναι η μοναδική μορφή N στο θρεπτικό διάλυμα, η πρόσληψη τους έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του pH του υποστρώματος. Το αντίθετο ισχύει, αν τα NH_4 είναι η μόνη πηγή N. Υπάρχουν ωστόσο κάποιες εξαιρέσεις, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και του είδους των φυτών της καλλιέργειας. Σε γενικές γραμμές, σε όξινο περιβάλλον, τα NO_3 απορροφώνται πιο εύκολα, ενώ τα NH_4 απορροφώνται καλύτερα σε υψηλότερο pH. Σε ένα pH 6,8 και τα δύο ιόντα προσλαμβάνονται το ίδιο. Η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ των δύο μορφών σε ένα θρεπτικό διάλυμα μπορεί να ρυθμίσει το pH μερικώς, αν και έχει βρεθεί ότι αυτό το μέσο ελέγχου του pH δεν είναι πάντα αποτελεσματικό.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι το ποσοστό των NH_4 στο θρεπτικό διάλυμα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% της συνολικής συγκέντρωσης N. Η καλύτερη αναλογία ιόντων είναι 75% NO_3 και 25% NH_4 . Αν τα NH_4 είναι η κύρια πηγή του N στο θρεπτικό διάλυμα, τότε μπορεί να εμφανιστούν συμπτώματα τοξικότητας στα φυτά. Ωστόσο, μια ποσότητα NH_4 στο θρεπτικό διάλυμα είναι επιθυμητή, καθώς πειράματα έχουν δείξει ότι η παρουσία τους διεγείρει την πρόσληψη NO_3 . Για το λόγο αυτό 5% του συνολικού N στο διάλυμα υπάρχει με τη μορφή των NH_4 . Στα συστήματα αεροπονίας εφαρμόζεται ένα ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού N (μέχρι το 25%) υπό μορφή NH_4 , προκειμένου να προκληθεί επίσης μεγάλη πρόσληψη NO_3 . Ανάλογα με το είδος του φυτού, το στάδιο της ανάπτυξής του, το ρυθμό ροής του θρεπτικού διαλύματος και άλλους παράγοντες, μπορούν να προσδιοριστούν και τα ανάλογα ποσοστά ισορροπίας όσον αφορά τη μορφή του N στο θρεπτικό διάλυμα. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή της σωστής αναλογίας NH_4 και NO_3 είναι τα είδη των φυτών. Για παράδειγμα, καρποφόρα φυτά, όπως η ντομάτα και πιπεριά, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε παροχή NH_4 . Όταν τα NH_4 είναι παρόντα στο θρεπτικό διάλυμα κατά την διάρκεια της άνθησης και της έναρξης καρπόδεσης, οι αποδόσεις σε καρπό μειώνονται ενώ στους καρπούς παρουσιάζεται μία φυσιολογική ασθένεια (blossom-end rot). Ως εκ τούτου, τα NH_4 μπορούν να συμπεριλαμβάνονται στο θρεπτικό διάλυμα κατά τη διάρκεια της πρώιμης βλαστικής περιόδου, αλλά στη συνέχεια θα πρέπει να αποκλείονται από την έναρξη της άνθησης έως το τέλος του κύκλου ανάπτυξης (Jones B, 2005).

Οι κοινές πηγές για $\text{NO}_3\text{-N}$ είναι το ένυδρο νιτρικό ασβέστιο $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, το νιτρικό κάλιο KNO_3 και νιτρικό οξύ HNO_3 , για NH_4 και NO_3 το νιτρικό αμμώνιο NH_4NO_3 και για NH_4 το μονοθειικό αμμώνιο $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ και το μονο-αμμώνιο ή δισόξινο φωσφορικό, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ή $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, αντίστοιχα. Η ουρία, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, δεν συνιστάται ως πηγή N σε υδροπονικά σκευάσματα καθώς με υδρόλυση παράγει NH_4 , τα οποία μπορούν να είναι ανεπιθύμητα σε ένα θρεπτικό διάλυμα. Το μόριο της ουρίας μπορεί να απορροφηθεί άμεσα από τις ρίζες των φυτών, αν και η παρουσία του στο φυτό μπορεί ή δεν μπορεί να είναι επιθυμητή (Jones B, 2005).

Στις ελληνικές θερμοκηπιακές υδροπονικές καλλιέργειες τα κρυσταλλικά υδατοδιαλυτά λιπάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος είναι τα εξής: νιτρική αμμωνία, νιτρικό ασβέστιο και νιτρικό κάλιο, ανάλογα με το pH του εδάφους και το στάδιο ανάπτυξης των φυτών (Παναγιωτόπουλος, 1995α).

Γενικά η περιεκτικότητα σε N είναι μεγαλύτερη κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης, σε σχέση με τα μεγαλύτερης ηλικίας φυτά. Είναι το στοιχείο που επηρεάζει περισσότερο την ανάπτυξη του φυτού, την απόδοση και την ποιότητα των παραγόμενων καρπών σε σχέση με τα υπόλοιπα μακροστοιχεία.

1.2.2.2 Φώσφορος (P)

Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους δεν υφίσταται ο ρυθμιστικός ρόλος της στερεάς φάσης του εδάφους. Επομένως, θα πρέπει στο θρεπτικό διάλυμα να υπάρχει ένα ρυθμιστικό απόθεμα διαλυτού P, το οποίο θα αποτρέπει τις γρήγορες αλλαγές συγκεντρώσεων ή και την περιοδική εξάντλησή του στο περιβάλλον των ριζών λόγω της απορρόφησής του από τα φυτά. Οι επιθυμητές συγκεντρώσεις P στα θρεπτικά διαλύματα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που έχουν αναφερθεί παραπάνω για τα εδαφικά διαλύματα και συνήθως ανέρχονται σε 1-1,5mmol/l (De Kreij et al., 1999). Υψηλότερες συγκεντρώσεις φωσφόρου στα θρεπτικά διαλύματα μπορούν να προκαλέσουν τοξικότητα P (Sonneveld, 2002; Sonneveld & Voogt, 2009).

Στα περισσότερα συστήματα εκτός εδάφους εφαρμόζεται σε ποσότητες μεταξύ 30 και 50 mg/L, αν και υπάρχουν ενδείξεις ότι πρέπει να μειωθεί στα 10-20 mg/L. Ο P βρίσκεται σε μορφή ανιόντος στο διάλυμα και τόσο η μορφή όσο και η διαθεσιμότητά του σχετίζεται με το pH του διαλύματος. Επίσης ο φώσφορος μπορεί να δημιουργήσει ιζήματα, με αποτέλεσμα τη δυσκολία απορρόφησής του, αλλά και να επηρεάσει επίσης την απορρόφηση και άλλων στοιχείων με τα οποία δημιουργεί ιζήματα όπως το Ca, τα SO_4 κλπ (Jones B, 2005). Η προσθήκη του γίνεται με φωσφορικό μονοαμμώνιο, φωσφορικό μονοκάλιο ή φωσφορικό οξύ. Το πρώτο είναι ευδιάλυτο λίπασμα το οποίο μειώνει αισθητά το pH του διαλύματος.

Χρησιμοποιείται μόνο συμπληρωματικά και όχι ως αποκλειστική πηγή φωσφόρου. Μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική μορφή χορήγησης αμμωνίας όταν δεν είναι επιθυμητή ή δυνατή η προσθήκη νιτρικής αμμωνίας. Το δεύτερο κατά σειρά λίπασμα, είναι ευδιάλυτο άλας το οποίο μειώνει και αυτό ελαφρώς το pH λόγω των ιόντων που απελευθερώνει. Αποτελεί την πλέον συνηθισμένη πηγή φωσφόρου για τα θρεπτικά διαλύματα. Τέλος το φωσφορικό οξύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα θρεπτικά διαλύματα αλλά θέλει προσοχή γιατί η προσθήκη του μειώνει σημαντικά το pH (Σάββας, 2011).

1.2.2.3 Κάλιο (K)

Το κάλιο είναι το κυρίαρχο ανόργανο στοιχείο στο φυτό. Το περιεχόμενό του κυμαίνεται 1,25 - 3% επί της ξηράς ουσίας, αν και υπάρχουν είδη φυτών που έχουν πολύ υψηλότερες απαιτήσεις K έως 10% (π.χ. μπανάνες). Οι καρποφόρες καλλιέργειες, όπως η ντομάτα και το αγγούρι έχουν υψηλότερες απαιτήσεις σε K από ό, τι κάποιες άλλες. Όπως και με το N και τον P, η συγκέντρωση K στο φυτό είναι αρχικά υψηλή (> 5%) και στη συνέχεια μειώνεται με την ηλικία. Το κάλιο μπορεί εύκολα να απορροφηθεί από τις ρίζες των φυτών και μπορεί να συσσωρεύεται στο φυτό σε επίπεδα υψηλότερα από τα φυσιολογικά (Jones B, 2005).

Η πρόσληψη του K είναι σημαντική κατά τη διάρκεια της παραγωγής λουλουδιών και καρπών, ενώ μειώνεται γρήγορα μετά την καρποφορία. Στις περισσότερες καρποφόρες καλλιέργειες, όπως η ντομάτα, καθώς επίσης και κάποιες ανθοκομικές καλλιέργειες, η απαίτηση για το K είναι υψηλή, κυρίως γιατί επηρεάζει σημαντικά τη μετασυλλεκτική διατήρηση των προϊόντων (Sonneveld & Voogt, 2009). Ως εκ τούτου, τα φυτά χωρίς επαρκές K κατά τη διάρκεια αυτής της κρίσιμης φάσης της ανάπτυξης, θα παράξουν καρπούς ή άνθη με αισθητά μειωμένη ποιότητα.

Αρκετά έχει μελετηθεί η ισορροπία μεταξύ των K, Ca, και Mg. Όταν η συγκέντρωση του K είναι υψηλή σε σύγκριση με αυτή του Ca ή Mg, τότε μπορεί να εμφανιστούν συμπτώματα έλλειψης Ca ή Mg. Η εμφάνιση έλλειψης Ca ή Mg μπορεί να ενισχυθεί από το γεγονός ότι το K απορροφάται και μεταφέρεται ευκολότερα στο φυτό από ότι το Ca ή το Mg. Αυτός ο ανταγωνισμός είναι μεγαλύτερος μεταξύ K και Mg από ότι μεταξύ K και Ca. Παρά τις διαφορές αυτές, πρέπει να διασφαλίζεται ότι θα υπάρχει η σωστή ισορροπία μεταξύ ιόντων K και Ca, Mg ώστε να αποφευχθεί τυχόν έλλειψη ενός εκ των δύο στοιχείων (Steiner, 1980).

Το κάλιο εύκολα παραλαμβάνεται από το φυτό και μπορεί να συσσωρεύεται σε αυτό σε επίπεδα που υπερβαίνουν τις μεταβολικές απαιτήσεις του, εάν είναι άμεσα διαθέσιμο στο υπόστρωμα. Η πρόσληψη μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την απορρόφηση των ανιόντων, ιδιαίτερα των NO₃, καθώς το φυτό προσλαμβάνει K για να διατηρήσει τη σωστή ισορροπία κατιόντων/ανιόντων στους ιστούς του.

Οι περισσότερες υδροπονικές συνταγές απαιτούν η συγκέντρωση Κ στο θρεπτικό διάλυμα να είναι περίπου 200 mg/L. Τα λιπάσματα για την παροχή Κ είναι νιτρικό κάλιο (KNO_3), θειικό κάλιο (K_2SO_4) και υπό ειδικές συνθήκες χλωριούχο κάλιο (KCl) (Jones B, 2005). Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται συμπληρωματικά το θειικό κάλιο, το οποίο είναι ευδιάλυτο (Σάββας, 2011).

1.3 Λιπάσματα

1.3.1 Γενικά

Τα λιπάσματα είναι χημικές ουσίες που προστίθενται στο έδαφος, ώστε να αυξηθεί η απόδοση της καλλιέργειας. Ανάλογα με τη φύση και την προέλευσή τους, τα λιπάσματα γενικά ταξινομούνται σε οργανικά ή ανόργανα, φυσικά ή συνθετικά και απλά ή σύνθετα. Η ορθολογική επιλογή του σωστού τύπου λιπάσματος, της δόσης και της κατάλληλης μεθόδου εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση, αποτελούν θεμελιώδους σημασίας παράγοντες για τη διόρθωση της ανεπάρκειας των εδαφών σε θρεπτικά συστατικά (Timilsena et al., 2015).

Σύμφωνα με τους Shoji and Gandeza (1992) ένα ιδανικό λίπασμα θα έπρεπε να πληροί τις παρακάτω τρεις προϋποθέσεις:

- 1) Μία και μόνο εφαρμογή θα έπρεπε να δίνει στα φυτά τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία που απαιτούνται για όλη την καλλιεργητική περίοδο.
- 2) Θα πρέπει να αποδίδει τη μέγιστη ποσότητα θρεπτικών ώστε να επιτυγχάνεται η σχέση $\frac{\text{απόδοση}}{\text{κόστος}}$
- 3) Θα πρέπει να έχει τις ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις στο έδαφος, το νερό και το ατμοσφαιρικό περιβάλλον.

Η διαχείριση της θρέψης συνδέεται στενά με τον τύπο του λιπάσματος που χρησιμοποιείται, τον χρόνο εφαρμογής, τη συχνότητα εφαρμογής και το σημείο εφαρμογής (Mikkelsen, 2011). Για παράδειγμα, η επιλεκτική απορρόφηση αμμωνιακού ή νιτρικού αζώτου εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος του φυτού (Raven, 1985; Marschner, 1995) και το στάδιο ανάπτυξής του, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι νεαρά φυτά ευνοούνται πολύ περισσότερο όταν η λίπανση περιέχει αμμωνιακό άζωτο παρά νιτρικό (Horchani et al, 2010). Ωστόσο τα περισσότερα φυτά έχουν ανάγκη και τις δύο μορφές αζώτου (Errebhi & Wilcox, 1990).

Τα πιο κοινά εμπορικά λιπάσματα είναι τα υδατοδιαλυτά γρήγορης απελευθέρωσης (QRF) τα οποία από τη στιγμή που θα τοποθετηθούν στο εδαφικό διάλυμα είναι άμεσα διαθέσιμα στα φυτά (Trenkel, 2010). Για το λόγο αυτό είναι ιδανικά για λίπανση πριν τη φύτευση. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της υδροπονίας η εφαρμογή θρεπτικού διαλύματος απευθείας στο υπόστρωμα όπου είναι εγκατεστημένα τα φυτά, έχει καταστήσει αναγκαία τη χρήση των υδατοδιαλυτών λιπασμάτων γρήγορης απελευθέρωσης. Τα QRF είναι πολύ πρακτικά και αποτελούν την καλύτερη και οικονομικότερη λύση για την καλλιέργεια, εφόσον επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες και κυρίως όταν δεν υπάρχει κίνδυνος έκπλυσης θρεπτικών

στοιχείων από πλημύρες ή άλλους παράγοντες. Σε πολλές ωστόσο περιπτώσεις, η απελευθέρωση όλων των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων σε μικρό χρονικό διάστημα, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα αφού δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας που αλλάζουν διαρκώς όσο τα φυτά αναπτύσσονται, κάτι που τελικά οδηγεί σε συμπληρωματικές εφαρμογές λιπασμάτων.

Η στρατηγική διαχείρισης που τελικά αναπτύχθηκε για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα περιλαμβάνει πολλές εφαρμογές κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας με μικρότερη δόση ανά εφαρμογή (side dressing), προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες των θρεπτικών στοιχείων, να αποφευχθεί το ενδεχόμενο κάψιμο των φυτών, ενώ παράλληλα αυτές να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των φυτών στη φάση που βρίσκονται (μεγιστοποίηση χρήσης λιπασμάτων). Η συχνή ωστόσο εφαρμογή του λιπάσματος επιβαρύνει το κόστος της καλλιέργειας και είναι πρακτικά εφαρμόσιμη μόνο στην περίπτωση κατά την οποία χορηγούνται με υδρολίπανση. Ανιχνεύοντας τα παραπάνω προβλήματα και προσπαθώντας να τα επιλύσει στο σύνολό τους, η παγκόσμια βιομηχανία λιπασμάτων ανέπτυξε και εισήγαγε στην αγορά δύο νέους τύπους λιπασμάτων, τα ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF και τα βραδείας απελευθέρωσης SRF, τα οποία άρχισαν να εφαρμόζονται ευρέως τα τελευταία χρόνια και σύμφωνα με μελέτες θα πρέπει πάντα να είναι μέρος της ορθής γεωργικής πρακτικής (Liu F.L, 2007).

1.3.2 Λιπάσματα υψηλής απόδοσης

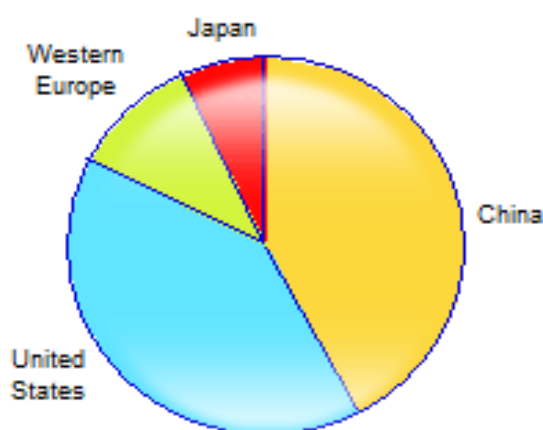
Τα λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF και τα βραδείας απελευθέρωσης SRF ανήκουν σε μια ευρύτερη κατηγορία λιπασμάτων βελτιωμένης ή υψηλής απόδοσης, στην οποία ανήκουν επίσης οι σταθεροποιητές άζωτου, οι αναστολείς νιτροποίησης, οι αναστολείς ουρεάσης και τα σταθεροποιημένα λιπάσματα (Shaviv, 2000). Τα λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης είναι κατά πλειοψηφία επικαλυμμένα. Αντίθετα τα λιπάσματα βραδείας απελευθέρωσης δεν είναι επικαλυμμένα και ενώ η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων είναι αργή, δεν μπορεί να ελεγχθεί. Το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς ανήκει στους σταθεροποιητές και στους αναστολείς, ενώ τα CRFs και τα SRF χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρότερες ποσότητες και επομένως θα μπορούσαν να θεωρηθούν «ειδικά λιπάσματα». Μεταξύ αυτών των δύο ειδικών λιπασμάτων, τα ελεγχόμενης απελευθέρωσης χρησιμοποιούνται περισσότερο (Timilsena et al., 2015).

Τα λιπάσματα βραδείας και ελεγχόμενης απελευθέρωσης μπορούν να περιέχουν μόνο άζωτο ή κάλιο, άζωτο και φώσφορο, άζωτο και κάλιο (με διαφορετικές μορφές καλίου), ή να περιέχουν τα τρία στοιχεία (N, P, K) μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλλα θρεπτικά συστατικά

και ιχνοστοιχεία. Ο χρόνος σταδιακής απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων από αυτά τα λιπάσματα μπορεί να κυμαίνεται από 20 ημέρες έως 18 μήνες (Shoji & Gandeza, 1992).

Αν και για τα παραπάνω λιπάσματα έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά τους, η χρήση τους μέχρι στιγμής είναι περιορισμένη, λόγω του υψηλού κόστους το οποίο μπορεί να είναι από 2,5 μέχρι 10 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τα κοινά λιπάσματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μόνο σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες όπου παράγονται προϊόντα υψηλής αξίας καθώς και σε χλοοτάπητες, τη λίπανση φυτών κηποτεχνίας κτλ.

Πολύ μεγαλύτερη χρήση CRF και SRF λιπασμάτων γίνεται στην Κίνα και στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής σε σχέση με την Δυτική Ευρώπη και την Ιαπωνία (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Παγκόσμια κατανάλωση CRF και SRF λιπασμάτων κατά το έτος 2014
Πηγή: <https://www.ihs.com/products/controlled-and-slow-release-chemical-economics-handbook.html>
(February 2015)

Η Αμερική αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη αγορά για τα CRF και τα SRF. Η Κίνα είναι ανερχόμενη σε ποσότητες τα τελευταία χρόνια και υπολογίζεται ότι η κατανάλωση των παραπάνω λιπασμάτων θα αυξηθεί κατά 12,8% ετησίως κατά τη διάρκεια των ετών 2014-2019. Οι αριθμοί αυτοί υποδηλώνουν την εφαρμογή των εν λόγω λιπασμάτων σε πολύ μεγάλες γεωργικές εκτάσεις.

Ειδικά τα επικαλυμμένα με πολυμερές υλικό λιπάσματα αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και όπως φαίνεται από τα στοιχεία θα συνεχίσουν με αυτό το ρυθμό. Συνολικά, η παγκόσμια ζήτηση για τα CRF και τα SRF θα συνεχίσει να αυξάνει περίπου 10% ετησίως κατά τα έτη 2014-2019 ιδιαίτερα για καλλιέργειες κηπευτικών και εγκαταστάσεις χλοοτάπητα, συμπεριλαμβανομένων και των εφαρμογών σε άλλες γεωργικές καλλιέργειες.

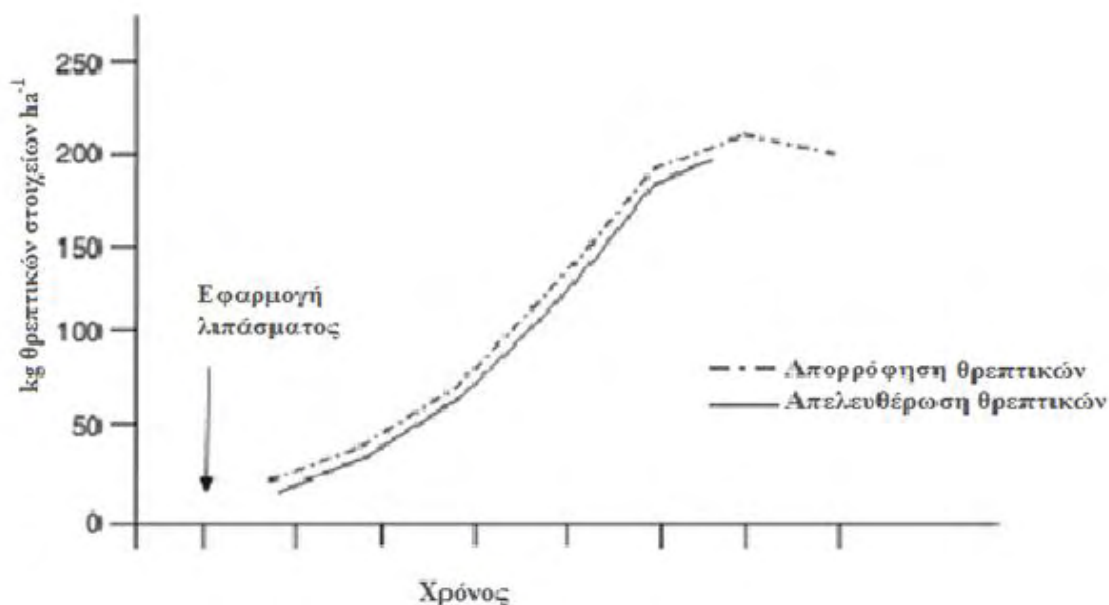
1.3.3 Λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF

Τα CRF είναι λιπάσματα επικαλυμμένα ή περιέχονται μέσα σε κάψουλα. Τα στοιχεία της επικάλυψης αποτελούνται από ανόργανα ή οργανικά υλικά τα οποία ελέγχουν τη διάρκεια, τον

τύπο και τη συχνότητα της απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων. Ο ρυθμός απελευθέρωσης θρεπτικών στοιχείων από ένα επικαλυμμένο προϊόν μπορεί να ελεγχθεί, μέχρι ένα βαθμό, μεταβάλλοντας το πάχος και τον τύπο της επικάλυψης, όπως επίσης αλλάζοντας και την αναλογία των υλικών επικάλυψης (Detrick, 1992; Goertz, 1993, 1995; Fujita, 1993; Fujita and Shoji, 1999; Fujita et al., 1989, 1990a; Pursell, 1992,1994; Shaviv, 2005). Η ικανότητα απορρόφησης υγρασίας μπορεί να ελεγχθεί αλλάζοντας τη σύνθεση του πολυμερούς υλικού της επικάλυψης.

Το πιο σημαντικό στοιχείο είναι ότι τα λιπάσματα αυτά είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να απελευθερώνουν θρεπτικά στοιχεία, τη στιγμή που το φυτό τα έχει ανάγκη. Η επικαλυμμένη ουρία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των λιπασμάτων. Αυτά τα λιπάσματα ελέγχουν την απελευθέρωση των θρεπτικών ουσιών με ημι-διαπερατή μεμβράνη, με απόφραξη, με αργή υδρόλυση, χρήση πρωτεϊνικών υλικών, υδατοδιαλυτών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους, άλλων χημικών στοιχείων ή με άλλα άγνωστα μέσα (Trenkel, 2010).

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η μορφή της εξέλιξης της απελευθέρωσης για ένα “ιδανικό” λίπασμα το οποίο συγχρονίζεται απόλυτα με τις ανάγκες του φυτού.



Σχήμα 2. Ρυθμός απελευθέρωσης θρεπτικών στοιχείων για το “ιδανικό” λίπασμα. Πηγή (Lammel, 2006).

Όσο μεγαλύτερη γίνεται η ανάγκη για παροχή θρεπτικών στοιχείων, τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό απελευθέρωσης στη μονάδα του χρόνου. Οι κατασκευαστές προσδιορίζουν σαν διάστημα απελευθέρωσης τις 70, 140, μέχρι και τις 400 ημέρες σε θερμοκρασία 25°C.

Ωστόσο, εάν τα επικαλυμμένα λιπάσματα δεν περιέχουν μόνο άζωτο αλλά και τα τρία βασικά στοιχεία NPK καθώς και ιχνοστοιχεία, τότε ο ρυθμός απελευθέρωσης των διαφόρων στοιχείων N, P, K, S, Ca, Mg και των ιχνοστοιχείων δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Συγκεκριμένα, είναι δύσκολο να καθοριστεί ο μηχανισμός απελευθέρωσης ειδικά για θρεπτικά στοιχεία εκτός των τριών βασικών (N, P, K) και των ιχνοστοιχείων.

1.3.3.1 Πλεονεκτήματα λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF .

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των CRF λιπασμάτων είναι:

- Παρουσιάζουν μειωμένη απώλεια θρεπτικών στοιχείων και βελτιωμένη απόδοση. Η εφαρμογή αυτών των λιπασμάτων μπορεί να μειώσει τη συνιστώμενη δόση κατά 20-30% από αυτή που προτείνεται για τα συμβατικά λιπάσματα για την ίδια καλλιέργεια (Trenkel, 2010).
- Ελαχιστοποιούν τους κινδύνους που εγκυμονεί η χρήση των λιπασμάτων όπως κάψιμο των φύλλων, μόλυνση υδάτων και εμφάνιση ευτροφισμού (η διαδικασία κατά την οποία το σώμα δέχεται υπερβολική δόση θρεπτικών). Ο χαμηλός ρυθμός απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να κρατήσει τις συγκεντρώσεις τους σε χαμηλά επίπεδα, μειώνοντας τον κίνδυνο έκπλυσης και υπερβολικής απορροής.
- Απαιτούν λιγότερες εφαρμογές, επομένως έχουμε μείωση κόστους παραγωγής.
- Επιτυγχάνεται ο βέλτιστος χρόνος και η βέλτιστη δόση εφαρμογής και μειώνονται οι κίνδυνοι για το περιβάλλον, ενώ παράλληλα βελτιώνεται το πρόγραμμα διαχείρισης της καλλιέργειας όσον αφορά τη θρέψη των φυτών (Best Practise Management).
- Ο περιορισμός του pH στα αλκαλικά εδάφη με αποτέλεσμα την βελτίωση της βιοδιαθεσιμότητας των θρεπτικών.

1.3.3.2 Μειονεκτήματα λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης CRF .

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των CRF λιπασμάτων είναι:

- Το υψηλό κόστος παραγωγής τους σε σχέση με τα συμβατικά, το οποίο προφανώς μετακυλά στο κόστος καλλιέργειας.
- Η μείωση του pH του εδάφους όταν εφαρμόζεται ουρία με επικάλυψη θείου η οποία μπορεί να προκαλέσει θρεπτικές διαταραχές όπως έλλειψη ασβεστίου ή μαγνησίου, αν δεν υπάρχει ένα κατάλληλο πρόγραμμα διαχείρισης των θρεπτικών στοιχείων.

- Η εμφάνιση έλλειψης θρεπτικών στοιχείων που μπορεί να εμφανιστούν εάν η απελευθέρωση δεν γίνει όπως έχει προβλεφθεί λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, πλημμυρισμένου ή ξερού εδάφους κλπ.

1.3.3.3 Λιπάσματα με επικάλυψη πολυμερούς υλικού.

Τα λιπάσματα με επικάλυψη ρητίνης είναι αυτά των οποίων οι επικαλύψεις συνήθως προετοιμάζονται με in-situ πολυμεροποίηση, καταλήγοντας σε μια φόρμα ενός υδροφοβικού πολυμερούς, το οποίο αποδομείται με θέρμανση. Οι δύο βασικές κατηγορίες κοινών ρητινών που χρησιμοποιούνται είναι οι αλκηδικές ρητίνες (πχ. Osmocote λιπάσματα) και οι πολουρεθανικές επικαλύψεις (πχ Polyon, Plantacote, Multicote λιπάσματα) (Trenkel, 1997).

Το πρώτο εμπορικό λίπασμα ελεγχόμενης απελευθέρωσης με επικάλυψη ρητίνης ήταν το Osmocote το οποίο παρασκευάστηκε στην Καλιφόρνια το 1967. Ο έλεγχος στην απελευθέρωση των θρεπτικών επιτυγχάνεται με τη σύνθεση ή το πάχος του υλικού της επικάλυψης. Ο Hauck (1985) περιέγραψε την απελευθέρωση των Osmocote ως εξής: το νερό διεισδύει στο υλικό της επικάλυψης διαμέσου μικροσκοπικών πόρων και αυξάνει την οσμωτική πίεση στην επικάλυψη τεντώνοντας την. Το τέντωμα προκαλεί αύξηση των μικροπόρων, υποβοηθώντας την απελευθέρωση μέσω αυτών. Ο συγκεκριμένος τύπος επικάλυψης μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία κοκκωδών λιπασμάτων (Shaviv, 2000).

Ο δεύτερος τύπος λιπασμάτων με επικάλυψη ρητίνης είναι τα πολουρεθανικά. Τα περισσότερα από τα οργανικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη κοκκωδών λιπασμάτων προσκολλώνται καλά στο ανόργανο πυρήνα, σχηματίζοντας έτσι ένα ανθεκτικό στην τριβή CRF κόκκο. Έτσι επιτυγχάνεται καλός έλεγχος του ρυθμού απελευθέρωσης μεταβάλλοντας το πάχος της επικάλυψης και τη σύνθεση της ρητίνης. Η απελευθέρωση των θρεπτικών συστατικών από αυτά τα προϊόντα εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία (Christianson, 1988; Raban, 1994; Moore, 1995), ενώ η υγρασία του εδάφους, το pH, η εναλλαγή διύγρυνσης και ξήρανσης, καθώς και η μικροβιακή δράση, έχουν μικρή επίδραση στην απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων (Christianson, 1988; Moore 1995). Σύμφωνα με τους Adams et al (2013), αλλά σε αντίθεση με αρκετές μελέτες, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στα ποσοστά αποδέσμευσης θρεπτικών στο νερό σε σχέση με ένα διυγγραμένο στερεό υπόστρωμα. Αυτό σημαίνει ότι οι ρυθμοί απελευθέρωσης που έχουν προσδιοριστεί για διάλυση των λιπασμάτων στο νερό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων που είναι βιο-διαθέσιμα σε υγρό έδαφος ή σε υπόστρωμα. Σε όλα τα CRF με επικάλυψη πολυμερούς υλικού, τα θρεπτικά

συστατικά που επηρεάστηκαν περισσότερο από τη θερμοκρασία ήταν κατά κανόνα τα N, K, B, Cu και Zn, ενώ αυτά που επηρεάστηκαν λιγότερο ήταν ο P, το Mg, και ο Fe.

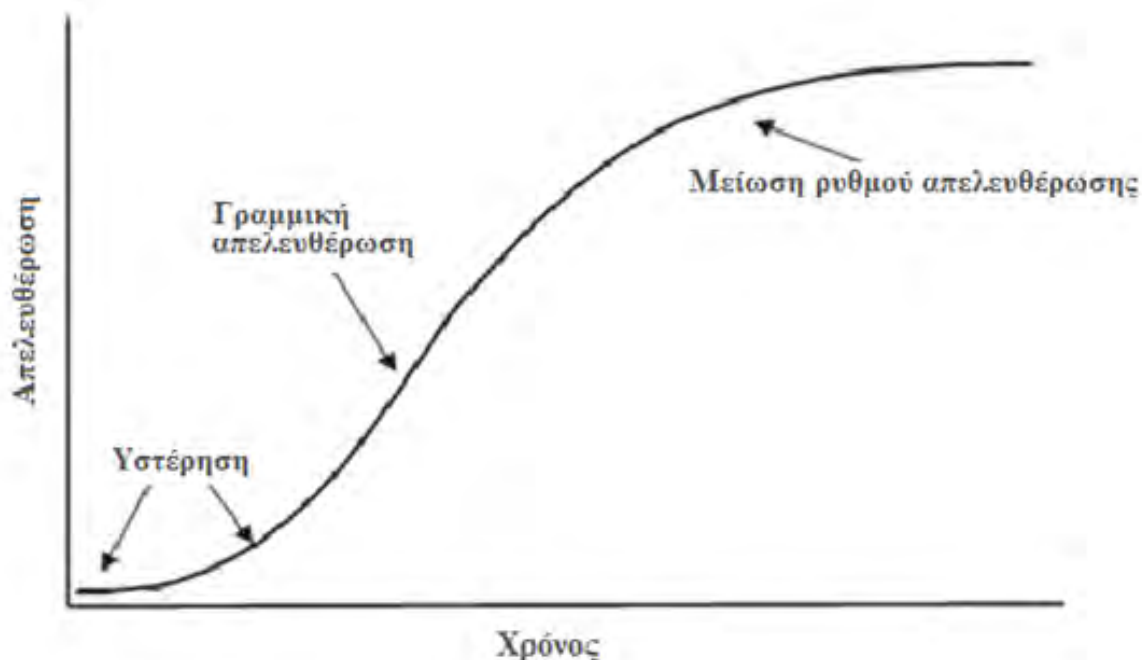
1.3.3.4 Λειτουργία μηχανισμού επικάλυψης

Τα λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης, CRFs, με επικάλυψη πολυμερούς θεωρούνται ότι έχουν καλύτερο έλεγχο στην απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων (Trenkel, 1997; Shaviv, 2000). Η απελευθέρωση σε αυτά τα λιπάσματα οφείλεται στον μηχανισμό διάχυσης. Η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων συναρτίζεται του χρόνου σε έναν σύνολο επικαλυμμένων λιπασμάτων ακολουθεί γενικά μια γραμμική ή σιγμοειδή καμπύλη (Raban et al., 1997; Shaviv, 2000) και μπορεί να συμπίπτει με αυτή που περιγράφει τις ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία (Shaviv, 1996).

Ο τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού επικάλυψης περιγράφεται ως εξής (Shaviv, 2000):

1. Κατά τη διάρκεια της περιόδου υστέρησης (lag period), νερό εισδύει στον κόκκο και διαλύει ένα μικρό ποσοστό του στερεού λιπάσματος. Μια πιθανή εξήγηση για την περίοδο υστέρησης είναι ότι απαιτείται ένα χρονικό διάστημα για την πλήρωση των εσωτερικών κενών των κόκκων με έναν κρίσιμο όγκο νερού. Εναλλακτικά, η περίοδος υστέρησης μπορεί να αποδοθεί στο χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία μιας σταθερής κατάστασης μεταξύ της ροής του νερού που εισέρχεται στον κόκκο και της ροής της διαλυμένης ουσίας που εξέρχεται. Μόλις επιτευχθεί μία σταθερή κατάσταση η μεταβολή του όγκου του κόκκου είναι αμελητέα.
2. Το δεύτερο στάδιο, αυτό της σταθερής απελευθέρωσης, ξεκινά όταν ένας όγκος κορεσμένου διαλύματος συσσωρεύεται στο εσωτερικό του κόκκου. Σταδιακά επέρχεται μια ισορροπία στο εσωτερικό του κόκκου μεταξύ διαλυμένου και αδιάλυτου ακόμη λιπάσματος. Η σταθερή συγκέντρωση κορεσμού, αποδίδει μία σταθερή κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά λιπάσματος, δεδομένου ότι η συγκέντρωση του λιπάσματος στο εξωτερικό διάλυμα είναι αμελητέα.
3. Μόλις το στερεό λίπασμα του πυρήνα διαλυθεί, η συγκέντρωση του εσωτερικού διαλύματος μειώνεται λόγω της συνεχιζόμενης ταυτόχρονης απελευθέρωσης θρεπτικών και της ροής του νερού μέσα στον κόκκο. Κατά συνέπεια, η κινητήρια δύναμη για την απελευθέρωση μειώνεται και ο ρυθμός απελευθέρωσης μειώνεται. Αυτό είναι το τρίτο στάδιο της απελευθέρωσης και ονομάζεται «στάδιο αποσύνθεσης».

Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η εξέλιξη της απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων συναρτήσει του χρόνου όπως περιγράφεται και παραπάνω.



Σχήμα 3. Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τον ρυθμό απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων από κόκκους CRF λιπάσματος με επικάλυψη πολυμερούς υλικού. Πηγή: (Shaviv, 2000).

1.3.4 MULTICOTE

1.3.4.1 Πως είναι κατασκευασμένα τα Multicote® σύμφωνα με πληροφορίες της εταιρείας Haifa Chemicals L.t.d.

Τα **Multicote®** βασίζονται στην τεχνολογία επένδυσης κόκκων που έχει αναπτύξει η Haifa Chemicals και αποκαλεί **MulticoTech™**. Πρόκειται για μια τεχνολογία που επιτυγχάνει αλληπάλληλα στρώματα επικάλυψης των κόκκων των λιπασμάτων με ένα πολυμερές υλικό φυσικής προέλευσης, που έχει την ικανότητα να επιτρέπει την είσοδο της εδαφικής υγρασίας μέσω των πόρων του και την έξοδο των διαλυμένων στο νερό ιόντων των λιπασμάτων. Στο τέλος της διαδικασίας όλο το περιεχόμενο των κόκκων διαλύεται στο νερό και εξέρχεται αφήνοντας μόνο το κούφιο επένδυμα που σταδιακά αποσυντίθεται βιολογικά. Κατά συνέπεια δεν μένουν επιβλαβή υπολείμματα στο έδαφος που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας της επένδυσης:



Σχήμα 4. Διαδικασία απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων από ένα **MulticoTech™** λίπασμα. Πηγή: <http://www.haifa-group.com>

Ανάλογα με τον αριθμό και το πάχος των αλληπαλλήλων στρωμάτων επικάλυψης των κόκκων μπορεί να επιτευχθεί χρόνος απόδοσης των θρεπτικών στοιχείων από 2 έως 16 μήνες και μάλιστα με ρυθμό σταθερό καθόλη τη διάρκεια της δράσης του λιπάσματος (Σχήμα 5), αφού η λειτουργία του συστήματος εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την θερμοκρασία του εδάφους στο οποίο βρίσκεται ο κόκκος.



Σχήμα 5. Επίδραση της σταθερής θερμοκρασίας στη σταθερή απελευθέρωση του λιπάσματος σε σχέση με το χρόνο παραμονής του στο έδαφος. Πηγή: <http://www.haifa-group.com>

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση πλήρως υδατοδιαλυτών λιπασμάτων προς επένδυση. Οι επενδεδυμένοι κόκκοι στην συνέχεια μπορούν να αναμιχθούν με άλλους και να δώσουν τελικά ένα σύνθετο κοκκώδες λίπασμα που μπορεί να περιέχει ένα ή πολλά θρεπτικά στοιχεία με ολική ή μερική επένδυση. Τα Multicote® αποτελούν μια σειρά πλήρως επενδεδυμένων σύνθετων NPK λιπασμάτων πλήρως υδατοδιαλυτών σε μορφή ομοιόμορφων σφαιρικών κόκκων. Στα Multicote® η επένδυση περιέχει όλα τα κύρια θρεπτικά στοιχεία του λιπάσματος με βαθμό επένδυσης 100% και με χρόνο απόδοσης θρεπτικών έως και 16 μήνες. Δευτερεύοντα θρεπτικά και ιχνοστοιχεία μπορεί επίσης να περιέχονται. Ειδικοί τύποι Multicote® μπορούν να παραχθούν σύμφωνα με τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε καλλιέργειας και τις απαιτήσεις των παραγωγών. Η απόδοση των θρεπτικών από τα Multicote® είναι σταθερή και συνεχής για όλο τον προκαθορισμένο χρόνο δράσης τους. Λόγω του ότι όταν πέφτει η εδαφική θερμοκρασία η ρίζα μειώνει τη δραστηριότητά της και τον ρυθμό πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων, έχουμε παραλληλισμό διαθεσιμότητας αποδιδόμενων από τα Multicote® θρεπτικών στοιχείων και απορρόφησής τους από τα φυτά.

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανθοκομίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τις 12/4/2016 έως τις 9/8/2016.

Χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικά λιπάσματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης, τα Multicote 4m της εταιρείας Haifa Chemicals L.t.d, με τύπους 14-14-14 και 15-7-15+ME τα οποία είναι 100% επικαλυμμένα (coated).

Η αναλυτική τους σύσταση σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας βρίσκεται στους πίνακες 1 και 2 στο τέλος του κεφαλαίου.

2.2 Πειραματικός σχεδιασμός

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 0,5gr του λιπάσματος 14-14-14 και 100ml απιονισμένου νερό για την παρασκευή διαλύματος. Στη συνέχεια έγιναν οι εξής μεταχειρίσεις.

1) Τρία διαλύματα με την παραπάνω σύνθεση ρυθμίστηκαν αρχικά σε pH 5,5, 6 και 6,5. Στα διαλύματα αυτά δεν έγινε καμμία ρύθμιση του pH για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα που διήρκησε το πείραμα.

2) Δύο διαλύματα με την παραπάνω σύνθεση ρυθμίστηκαν αρχικά σε pH 5,5 και στη συνέχεια γίνονταν ρύθμιση της τιμής του pH με προσθήκη NaOH ή HCl στην αρχική τιμή κάθε τρεις ημέρες. Το ένα από τα διαλύματα αυτά παρέμεινε σε θερμοκρασία 24°C ενώ το άλλο μεταφέρθηκε σε θερμοκρασία 18°C από την τέταρτη ημέρα παρασκευής του και μετά. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για δύο άλλα διαλύματα, ένα με αρχικό pH 6 και ένα με pH 6,5, τα οποία παρέμειναν σε θερμοκρασία 24°C.

Οι ίδιες μεταχειρίσεις ακολουθήθηκαν και για το διάλυμα 300ml που παρασκευάστηκε με 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 και χρήση απιονισμένου νερού.

Τέλος παρασκευάστηκαν δύο διαλύματα όγκου 4lt με διάλυση 0,5 λιπασμάτων 14-14-14 και 15-7-15 αντίστοιχα σε αρχικό pH 5,5 και παρέμειναν σε θερμοκρασία 24°C.

Δεν έγιναν επαναλήψεις των μεταχειρίσεων λόγω του μεγάλου όγκου των μετρήσεων.

2.3 Μετρήσεις

Σε δείγματα που λαμβάνονταν κάθε 3 ημέρες από τα προαναφερθέντα διαλύματα μετρήθηκαν:

A) οι συγκεντρώσεις των NO_3 , NH_4 , PO_4 , με τη χρήση φωτόμετρου SMART2 COLORIMETER της LAMOTTE και του K με τη χρήση φωτόμετρου PALINTEST.

B) η τιμή του pH, σε χρονικά διαστήματα όπως προαναφέρθηκαν με τη χρήση πεχαμέτρου.

Πίνακας 1: Σύνθεση Λιπάσματος 14-14-14 (100% coated)

Ολικό Άζωτο (N)	14%
Υδατοδιαλυτό πεντοξείδιο του φωσφόρου(P_2O_5)	14%
Οξείδιο του καλίου (K_2O)	14%

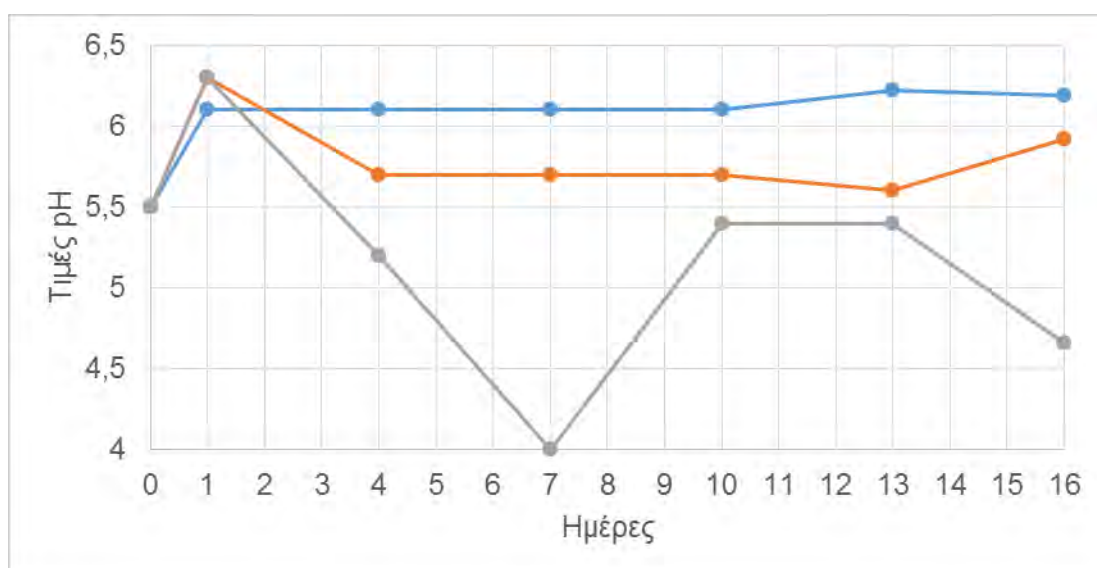
Πίνακας 2: Σύνθεση Λιπάσματος 15-7-15 +2MgO+ME (100%coated)

Βασικά θρεπτικά		Μικροστοιχεία	
Ολικό Άζωτο (N)	15%	Σίδηρος (Fe)	0.45%
Άζωτο από νιτρικά (N-NO_3)	6.6%	Μαγγάνιο (Mn)	0.07%
Άζωτο από αμμωνιακά (N-NH_4)	8.4%	Χαλκός (Cu)	0.05%
Πεντοξείδιο του φωσφόρου (P_2O_5)	7%	Μολυβδαίνιο (Mo)	0.009%
Υδατοδιαλυτό οξείδιο του καλίου (K_2O)	15%	Ψευδάργυρος (Zn)	0.07%
Οξείδιο του μαγνησίου (MgO)	2%	Βόριο (B)	0.03%
Θείο (S)	7%		

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

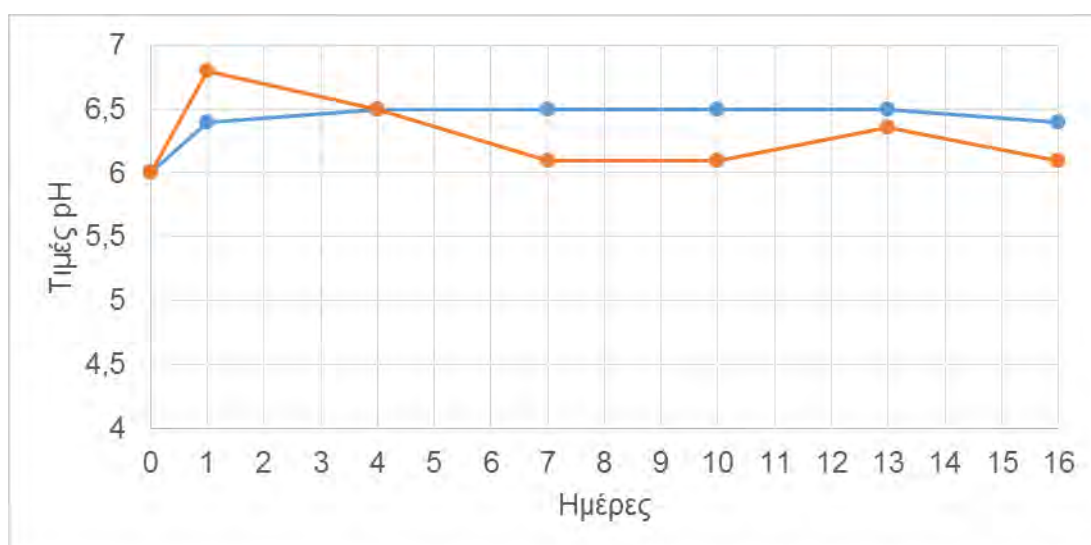
3.1 Μέτρηση της μεταβολής της τιμής του pH.

Από τις μετρήσεις του pH που πραγματοποιήθηκαν σε διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού και τα οποία ρυθμίστηκαν αρχικά σε τιμή pH 5,5, φαίνεται ότι: i) στο διάλυμα στο οποίο δεν έγινε καμμία περαιτέρω ρύθμιση της τιμής του pH κατά τη διάρκεια του πειράματος, το pH αυξήθηκε μία μέρα μετά την παρασκευή του διαλύματος από 5,5 σε 6,1 και στη συνέχεια η τιμή του παρέμεινε σταθερή. Στο διάλυμα αυτό πιθανόν η ισορροπία των διαλυμένων θρεπτικών στοιχείων που περιέχει το λίπασμα μπορεί να σταθεροποιήσει την τιμή του pH σε υψηλότερα επίπεδα από τα επιθυμητά, ii) στα διαλύματα στα οποία έγινε συνεχής διόρθωση της τιμής του pH η τιμή τους αυξήθηκε (6,3) κατά τη διάρκεια των πρώτων τριών ημερών από την παρασκευή τους πάνω από το επιθυμητό επίπεδο (5,5), ενώ στη συνέχεια για το διάλυμα που παρέμεινε στους 24°C η διόρθωση που επιχειρήθηκε διατήρησε το pH του διαλύματος κοντά στην τιμή-στόχο, ενώ το διάλυμα το οποίο μεταφέρθηκε σε θερμοκρασία 18°C παρουσίασε έντονες μεταβολές στην τιμή του pH η οποία δεν μπόρεσε να ρυθμιστεί τελικά επιτυχώς (Διάγραμμα 1).



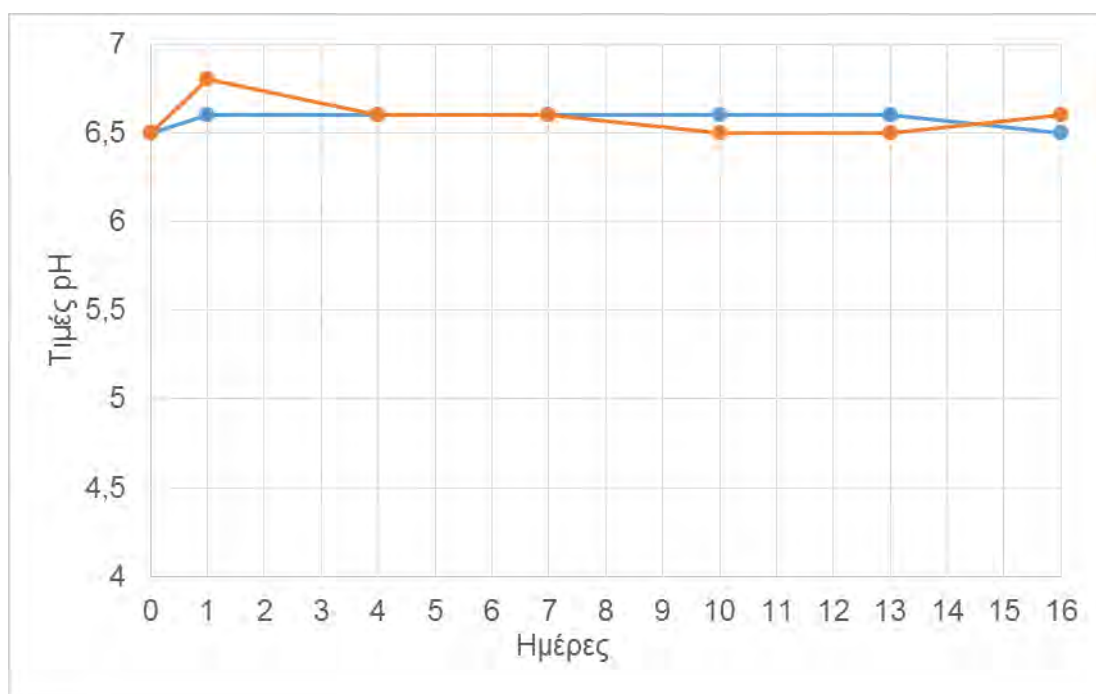
Διάγραμμα 1. Μεταβολή της τιμής του pH σε σχέση με το χρόνο για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, και τα οποία παρέμειναν χωρίς περαιτέρω ρύθμιση (-----), ή διορθώνονταν συνεχώς στην τιμή 5,5 και παρέμειναν στους 24°C (-----) και στους 18°C (-----).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των τιμών του pH που έγιναν σε δύο διαλύματα που προέκυψαν από προσθήκη 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, τα οποία τοποθετήθηκαν στους 24°C και ρυθμίστηκαν αρχικά σε pH 6, προκύπτει το Διάγραμμα 2 στο οποίο φαίνεται ότι: i) στο διάλυμα που η τιμή του pH ρυθμίστηκε μόνο την ημέρα της παρασκευής του, υπήρξε μία αύξηση του pH κοντά στην τιμή 6,4, ενώ στη συνέχεια η τιμή σταθεροποιείται στην τιμή αυτή. Αυτή η μορφή της μεταβολής του pH σε σχέση με το χρόνο παρατηρήθηκε και στο Διάγραμμα 1 για διάλυμα ίδιου λιπάσματος με αρχικό ρυθμισμένο pH 5,5, στο οποίο δεν έγινε καμμία περαιτέρω ρύθμιση. Η μεταβολή ήταν παρόμοια κατά 0,5 και η σταθεροποίηση άρχισε μετά την 3^η ημέρα. Πιθανώς και εδώ η σταθεροποίηση να οφείλεται στην ισορροπία που επήλθε μεταξύ των διαλυμένων θρεπτικών στοιχείων όπως και στην περίπτωση του λιπάσματος που ρυθμίστηκε σε pH 5,5 ii) στο δεύτερο διάλυμα στο οποίο το pH ρυθμίζονταν συνεχώς, την τρίτη ημέρα η τιμή του φτάνει στο 6,9, την ίδια ημέρα που στο προηγούμενο διάλυμα όπως αναφέρθηκε στην περίπτωση (i) η τιμή του pH ήταν 6,4. Αυτό ίσως οφείλεται στην ανομοιομορφία των κόκκων του λιπάσματος που διαλύθηκε στην κάθε περίπτωση και στην ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων που περιείχαν. Το διάλυμα αυτό δεν κατάφερε να ρυθμιστεί σωστά γιατί έφτασε πρόσκαιρα στην τιμή-στόχο την 10^η έως 13^η ημέρα (ενώ η διόρθωση άρχισε την 3^η ημέρα) για να αυξηθεί ξανά κοντά στην τιμή 6,4 την 16^η ημέρα.



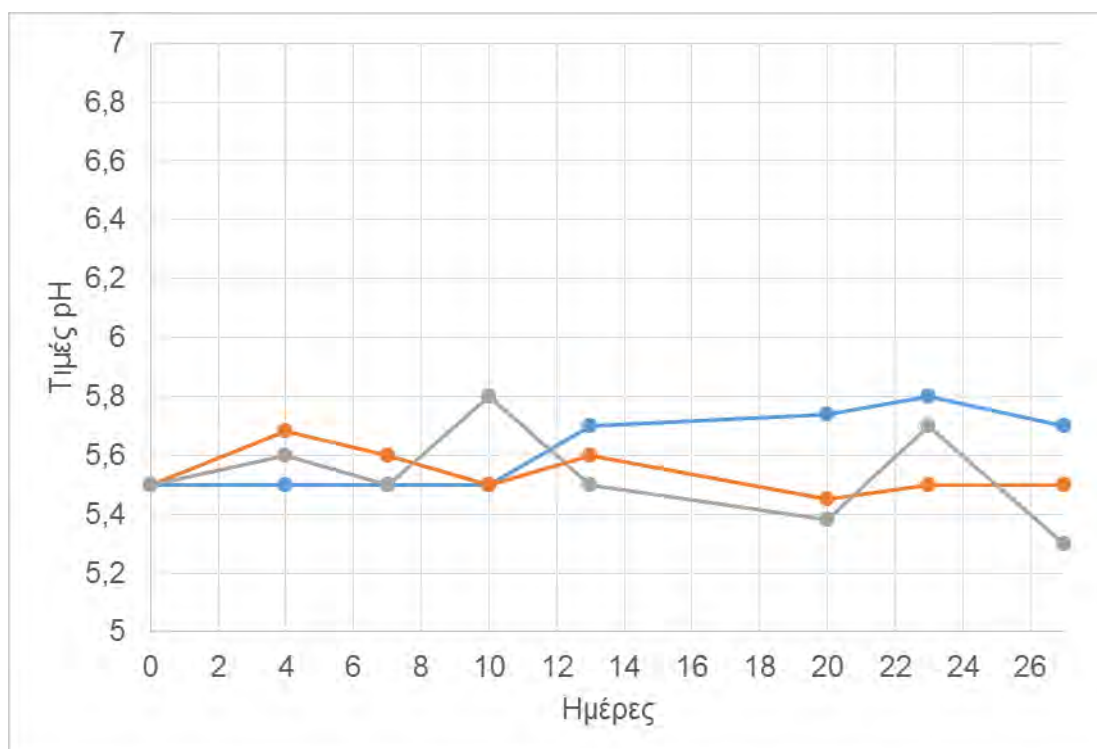
Διάγραμμα 2. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (---) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6, ενώ το δεύτερο (----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.

Την ίδια περίπου μορφή εξέλιξης του pH σε σχέση με το χρόνο παρουσιάζουν και τα δύο διαλύματα που προέκυψαν από 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 και 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, σε αρχικό ρυθμισμένο pH 6,5 (Διάγραμμα 3). Στο πρώτο διάλυμα το οποίο ρυθμίστηκε μόνο την ημέρα της παρασκευής του, η τιμή του pH παρέμεινε σχεδόν σταθερή μέχρι και την 16^η ημέρα. Το διάλυμα αυτό θεωρήθηκε σταθεροποιημένο χωρίς ανάγκη ρύθμισης. Το δεύτερο διάλυμα που ρυθμίζονταν συνεχώς παρουσίασε μια αύξηση την 3^η ημέρα, η οποία μπορεί να αποδοθεί όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, στην ανομοιομορφία των κόκκων του λιπάσματος και στη σύστασή τους. Και αυτό το διάλυμα παρέμεινε σταθερό με μικρή ανάγκη ρύθμισης. Από τα παραπάνω (Διαγράμματα 1,2,3) φαίνεται ότι το pH του διαλύματος του λιπάσματος 14-14-14, σταθεροποιείται μεταξύ των τιμών 6 και 6,5, πιθανόν λόγω της σύστασής του. Η σταθεροποίηση αυτή ξεκίνησε σε όλες τις περιπτώσεις μετά την 3^η ημέρα.



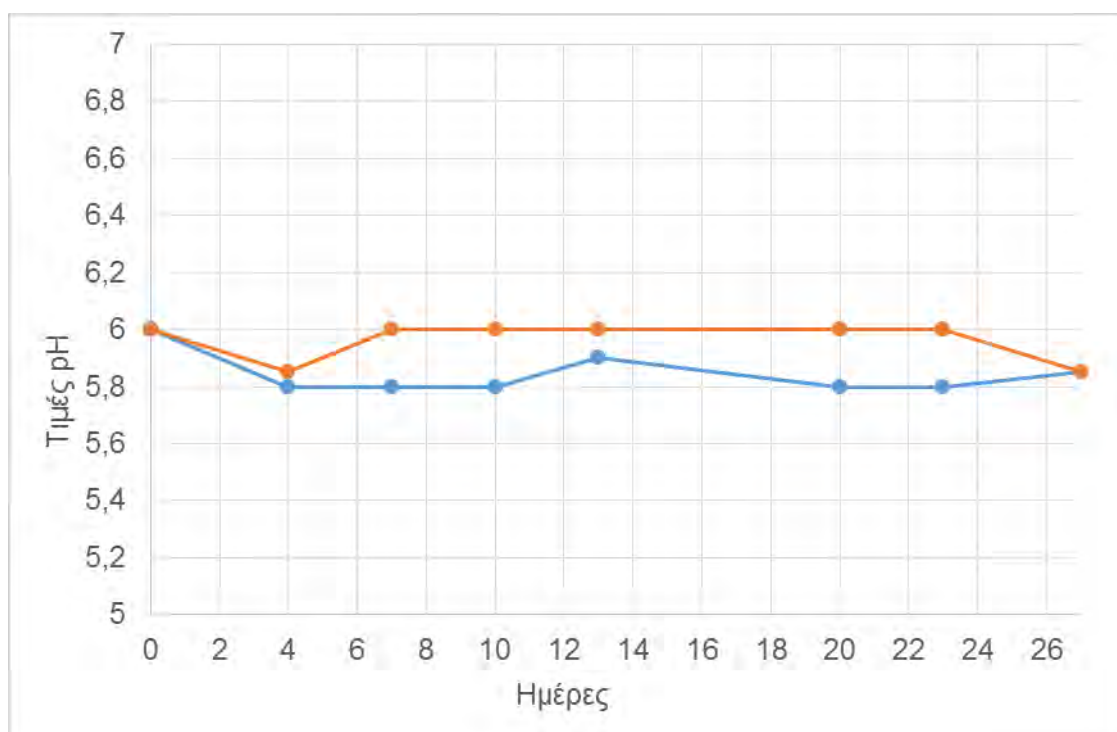
Διάγραμμα 3. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6,5, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6,5, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.

Οι μετρήσεις που έγιναν σε τρία διαλύματα όγκου 300ml έκαστο, στο καθένα από τα οποία διαλύθηκαν 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 και το pH τους ρυθμίστηκε σε μια αρχική τιμή 5,5, έδειξαν ότι (Διάγραμμα 4): i) στο διάλυμα, που η τιμή του pH δεν ξαναρυθμίστηκε, παρουσιάζεται όπως και στο διάλυμα που γίνονταν συνεχώς ρύθμιση της τιμής του δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές μεταβολές (οι τιμές κυμάνθηκαν από 5,5 μέχρι 5,8). Ιδιαίτερα στο διάλυμα στο οποίο γίνονταν ρύθμιση επιτεύχθει μία τιμή pH πολύ κοντά στην τιμή-στόχο, δείχνοντας πιθανά ότι η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων προκαλεί μικρή μεταβολή στην τιμή του pH. ii) Το διάλυμα που τοποθετήθηκε στους 18°C παρουσίασε και αυτό μια σταθερή πορεία με πολύ μικρές μεταβολές στην τιμή του pH, έχοντας μια αντίστοιχη πορεία όπως και τα δύο προηγούμενα διαλύματα. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το pH των διαλυμάτων δεν επηρεάστηκε από τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων σε όλες τις περιπτώσεις.



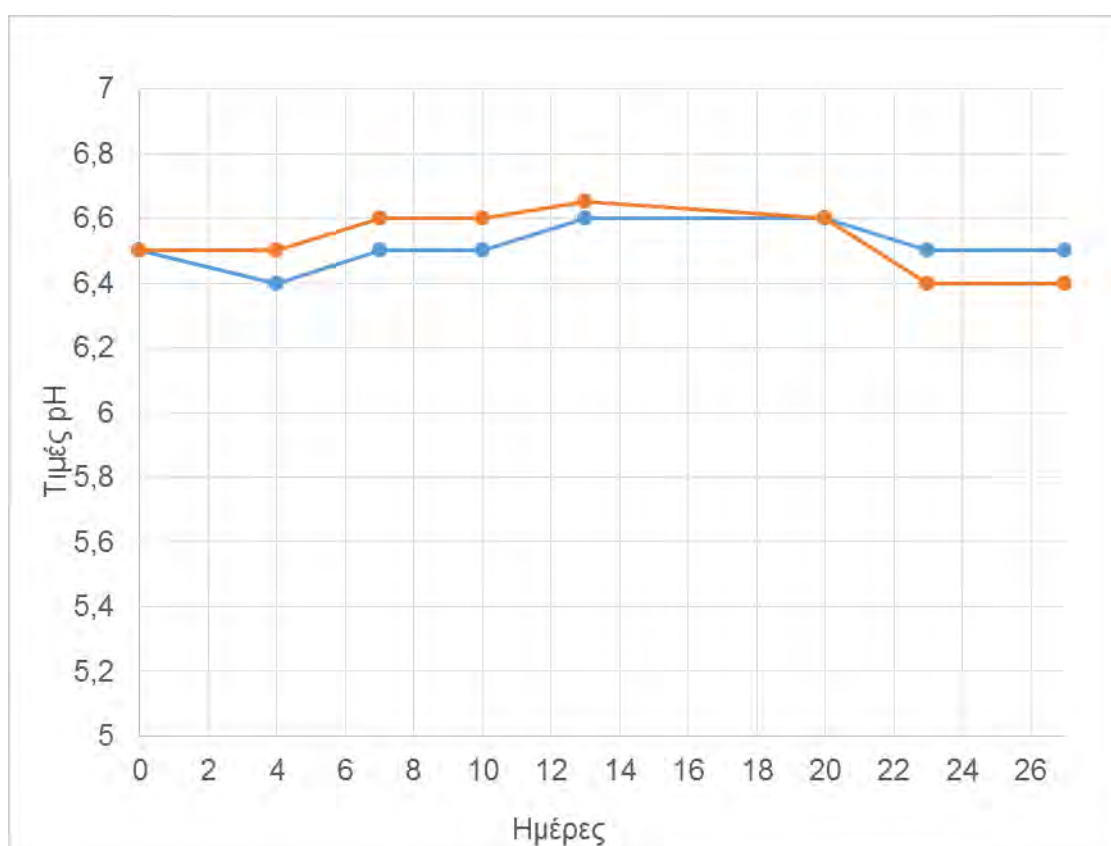
Διάγραμμα 4. Μεταβολή της τιμής του pH σε σχέση με το χρόνο για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, και τα οποία παρέμειναν χωρίς περαιτέρω ρύθμιση (---), ή διορθώνονταν συνεχώς στην τιμή 5,5 και παρέμειναν στους 24°C (----) και στους 18°C (---).

Στο Διάγραμμα 5 απεικονίζεται η μεταβολή στις τιμές του pH δύο διαλυμάτων που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο και το πρώτο αφού ρυθμίστηκε στην παρασκευή του σε pH 6 δεν ξαναδιορθώθηκε ενώ το δεύτερο επιδέχονταν συνεχείς διορθώσεις. Όσον αφορά το πρώτο διάλυμα παρατηρείται μια πτώση στο pH από την πρώτη ημέρα η οποία παραμένει μέχρι το τέλος των μετρήσεων και ενδεχομένως να οφείλεται στην αντίστοιχη απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων. Το δεύτερο διάλυμα που ρυθμίζονταν εμφανίζει την πρώτη ημέρα πτώση μέχρι το 5,8 στην τιμή του pH, ενώ στη συνέχεια επανέρχεται άμεσα στην αρχική τιμή 6 που σημαίνει ότι ανταποκρίνεται επιτυχώς στη διόρθωση της τιμής του και μετά την 23^η ημέρα παρουσιάζει και πάλι μια μικρή πτώση μέχρι το 5,8, η οποία ενδεχομένως να σχετίζεται με τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα.



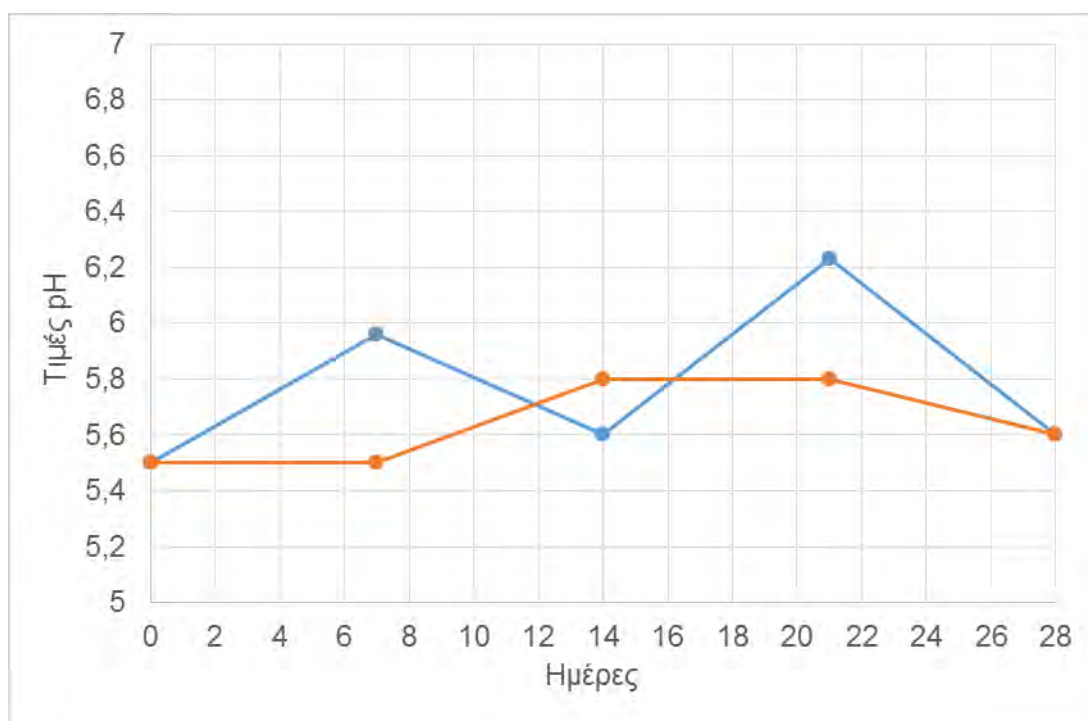
Διάγραμμα 5. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (-----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6, ενώ το δεύτερο (-----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.

Παρόμοια μορφή στις καμπύλες τους παρουσιάζουν δύο διαλύματα τα οποία παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 διαλυμένα σε 300ml απεσταγμένο νερό, εκ των οποίων το πρώτο ρυθμίστηκε μόνο στην παρασκευή του ως προς το pH σε τιμή 6,5 και στο δεύτερο εξακολουθούσε να διορθώνεται ως προς το pH του (Διάγραμμα 6). Και στα δύο διαλύματα παρατηρούνται ελάχιστες διακυμάνσεις στις τιμές του pH από την αρχή με τάση σταθεροποίησης στην αρχική τιμή-στόχο. Είναι εμφανές από τα Διαγράμματα 4, 5, 6 ότι τα διαλύματα που προέρχονται από το λίπασμα 15-7-15 δεν μεταβάλλουν τις τιμές του pH, είτε ρυθμίζονται είτε όχι, που σημαίνει ότι η συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων δεν επηρεάζει τις τιμές του pH.



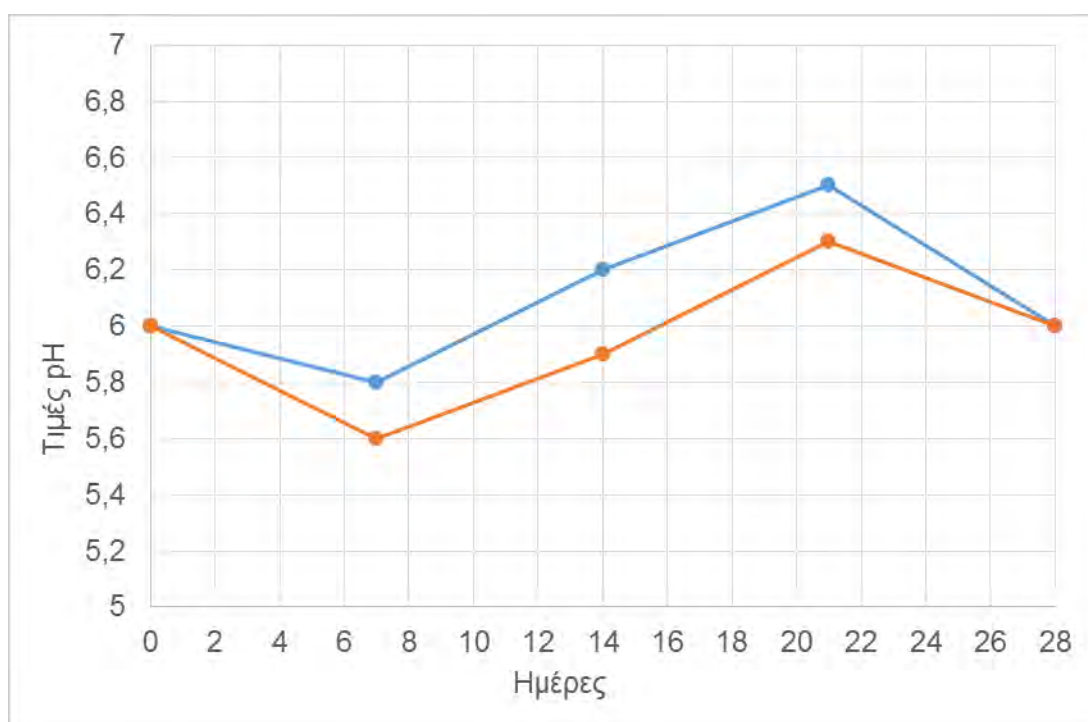
Διάγραμμα 6. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού, εκ των οποίων, στο πρώτο (----) δεν έγινε άλλη ρύθμιση του pH, εκτός της αρχικής στο 6,5, ενώ το δεύτερο (----) ρυθμίζονταν συνεχώς με τιμή-στόχο 6,5, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C.

Σε δύο διαλύματα που προέκυψαν μετά από προσθήκη 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 και 15-7-15 και όγκο 4lt έκαστο, με αρχική τιμή pH 5,5, η οποία συνεχώς διορθώνονταν καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρείται μία διαφορετική μεταβολή της τιμής του pH (Διάγραμμα 7). Το διάλυμα που περιέχει ποσότητα λιπάσματος από το 14-14-14 παρουσιάζει έντονες μεταβολές της τιμής (από 5,5 μέχρι 6,23) καθόλη τη διάρκεια του πειράματος και μία αδυναμία ρύθμισης του pH κοντά στην τιμή-στόχο, σε αντίθεση με το διάλυμα που περιέχει ποσότητα από το 15-7-15 το οποίο φαίνεται πιο σταθερό (τιμές από 5,5 μέχρι 5,8) και ανταποκρίνεται καλύτερα στη ρύθμιση. Η διαφορά αυτή στη συμπεριφορά των δύο διαλυμάτων, ενδεχομένως να οφείλεται στη διαφορετική σύνθεση των λιπασμάτων που περιέχουν, δεδομένου ότι δέχονται ακριβώς την ίδια μεταχείριση, στις ίδιες συνθήκες, σε pH 5,5.



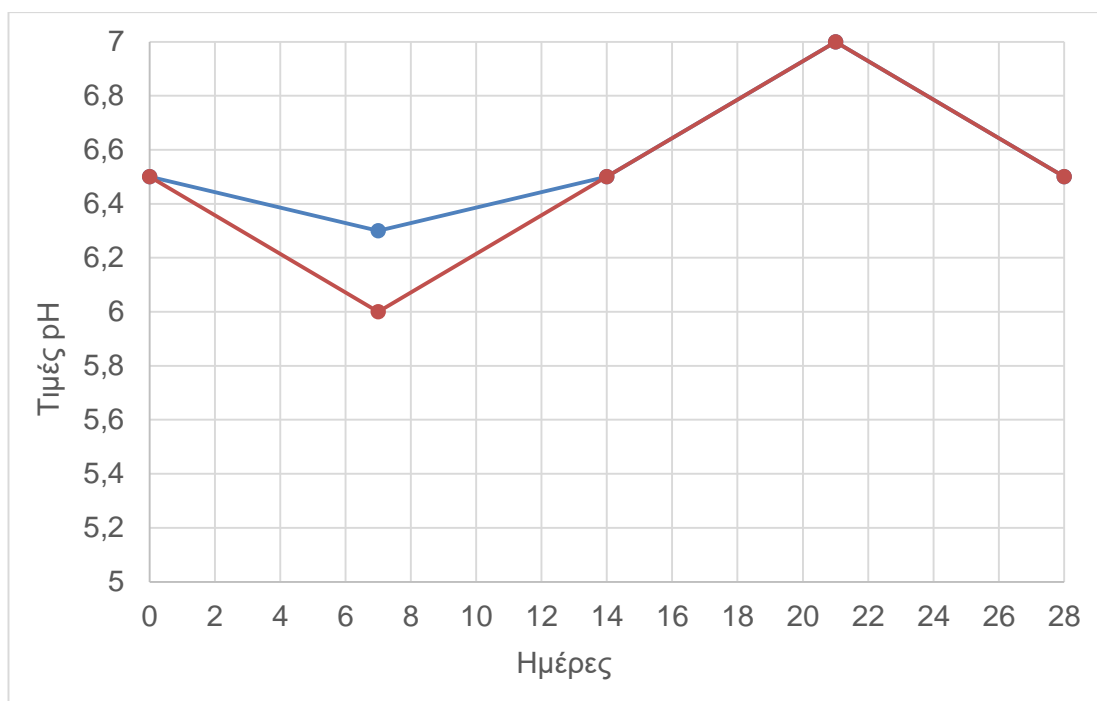
Διάγραμμα 7. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (-----) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (-----) σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα, σε αρχικό pH 5,5 παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς

Η μεταβολή του pH σε δύο διαλύματα όγκου 4lt το καθένα, τα οποία παρασκευάστηκαν μετά από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε απιονισμένο νερό στο ένα και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 στο άλλο, παρουσιάζει παρόμοια μορφή εξέλιξης σε σχέση με το χρόνο (Διάγραμμα 8). Στα διαλύματα αυτά παρατηρείται μία πτώση της τιμής του pH τις πρώτες εφτά ημέρες και άνοδος αμέσως μετά, μέχρι την 21^η ημέρα, ενώ στην τελευταία μέτρηση έχουν επανέλθει στην αρχική τιμή. Το διάλυμα που προέρχεται από το λίπασμα 14-14-14 παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβολή στην τιμή του pH σε σχέση με το διάλυμα που προέρχεται από το λίπασμα 15-7-15, που πιθανά να οφείλεται στη διαφορετική σύνθεσή του και στη μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα.



Διάγραμμα 8. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (---) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (---) σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα, σε αρχικό pH 6, παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς.

Σε δύο διαλύματα όγκου 4lt στα οποία διαλύθηκαν ποσότητες 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 και το pH ρυθμίστηκε σε αρχική τιμή 6,5, ελήφθησαν μετρήσεις από τις οποίες φαίνεται ότι υπάρχει συµµεταβολή των τιμών του pH των δύο διαλυμάτων. Και στα δύο διαλύματα παρατηρείται μία πτώση της τιμής κάτω από την αρχικά ρυθμιζόµενη, όπως και έντονες µεταβολές από 6 μέχρι και 7. Από τα Διαγράµµατα 8 και 9 φαίνεται ότι, διαλύματα που προκύπτουν µε τη χρήση των δύο παραπάνω λιπασµάτων παρουσιάζουν µια παρόµοια µεταβολή της τιμής του pH όταν η αρχική του τιμή κατά την παρασκευή του διαλύµατος είναι µεγαλύτερη ή ίση του 6. Σε αυτά τα διαλύµατα φαίνεται να είναι δύσκολη η ρύθμιση της τιμής του pH καθόλη τη διάρκεια των µετρήσεων, ενώ το εύρος µεταβολής της τιμής του pH φτάνει και τη µία µονάδα. Τέτοιες µεγάλες µεταβολές µπορούν να προκαλέσουν αντίστοιχα µεγάλες µεταβολές των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυµα.



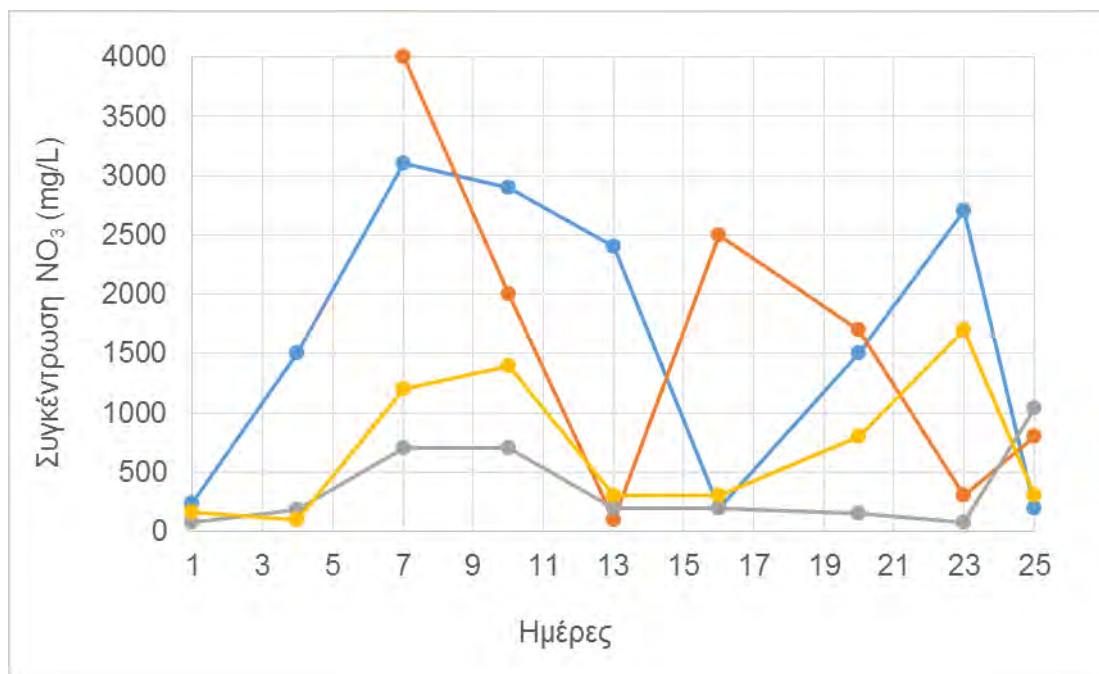
Διάγραμμα 9. Μεταβολή της τιμής του pH συναρτήσει του χρόνου για διαλύματα που παρασκευάστηκαν με ποσότητα 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 (-----) και 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 (-----) σε όγκο 4 lt απιονισμένου νερού, το καθένα, σε αρχικό pH 6,5 παραμένοντας και τα δύο στους 24°C, στα οποία διορθώνονταν το pH συνεχώς.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα διαλύματα με όγκο 100ml και 300 ml που παρασκευάστηκαν με διάλυση του λιπάσματος 14-14-14 και 15-7-15 και είχαν αρχικό pH από 5,5 έως 6,5, παρουσιάζουν καθόλου ή μικρή αύξηση της τιμής του κατά 0,5 η οποία τελικά σταθεροποιείται στην τιμή 6-6,5. Η μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται μέχρι την 3^η ημέρα και ενδεχομένως να οφείλεται σε απελευθέρωση ή συνένωση θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα ενώ από το χρονικό αυτό διάστημα και μετά παρατηρείται σταθεροποίηση. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι τα διαλύματα αυτά μπορούν να ρυθμιστούν καλύτερα όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 1 έως 6. Σε όλες τις περιπτώσεις που τα διαλύματα παρέμειναν σε χαμηλότερη θερμοκρασία (18°C) όλα τα παραπάνω φαινόμενα ήταν εντονότερα σε σχέση με τα διαλύματα που παρέμειναν στους 24°C. Αυτό μπορεί να συσχετίζεται με τη μεταβολή της διαπερατότητας του υλικού επικάλυψης του λιπάσματος, η οποία επηρεάζει και την αντίδραση του πυρήνα του λιπάσματος στη μεταβολή του pH του διαλύματος και κατά συνέπεια στο ρυθμό διάλυσης των θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται εγκλωβισμένα σε αυτόν, καθώς και στη διάχυσή τους στο διάλυμα.

Στα διαλύματα με όγκο 4lt που παρασκευάστηκαν με διάλυση του λιπάσματος 14-14-14 ή 15-7-15, και είχαν αρχική τιμή pH 5,5 η οποία ρυθμιζόνταν συνεχώς, μόνο το διάλυμα του λιπάσματος 14-14-14 παρουσιάζει έντονη μεταβολή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, η οποία οφείλεται αρχικά στην έντονη αποδέσμευση θρεπτικών στοιχείων και στη συνέχεια στην ιζηματοποίησή τους, που οδηγεί και στη μεταβολή του pH. Σε αυτό συνηγορεί και το σταθερό χρονικό διάστημα των 7 ημερών που μεσολαβούσε μεταξύ των μεγίστων και των ελαχίστων τιμών του pH. Στο διάλυμα που παρασκευάστηκε με τη χρήση του λιπάσματος 15-7-15 η συνεχής ρύθμιση του pH στην τιμή 5,5 φαίνεται να είναι επιτυχής αρχικά, στη συνέχεια όμως μάλλον προκαλεί έντονη αποδέσμευση θρεπτικών στοιχείων και γρηγορότερη μεταβολή του pH, το οποίο δεν μπορεί να ρυθμιστεί επιτυχώς. Κατά συνέπεια, τα διαλύματα αυτά παρουσίασαν μια σχετική δυσκολία στη ρύθμιση του pH. Μεγαλύτερη ένταση στο φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω παρατηρήθηκε όταν οι αρχικές τιμές του pH στα διαλύματα ήταν μεγαλύτερες ή ίσες του 6. Στα διαλύματα αυτά απέτυχε η ρύθμιση του pH παρότι ο όγκος του διαλύματος ήταν μεγαλύτερος (4lt) από αυτά των 100ml και των 300ml.

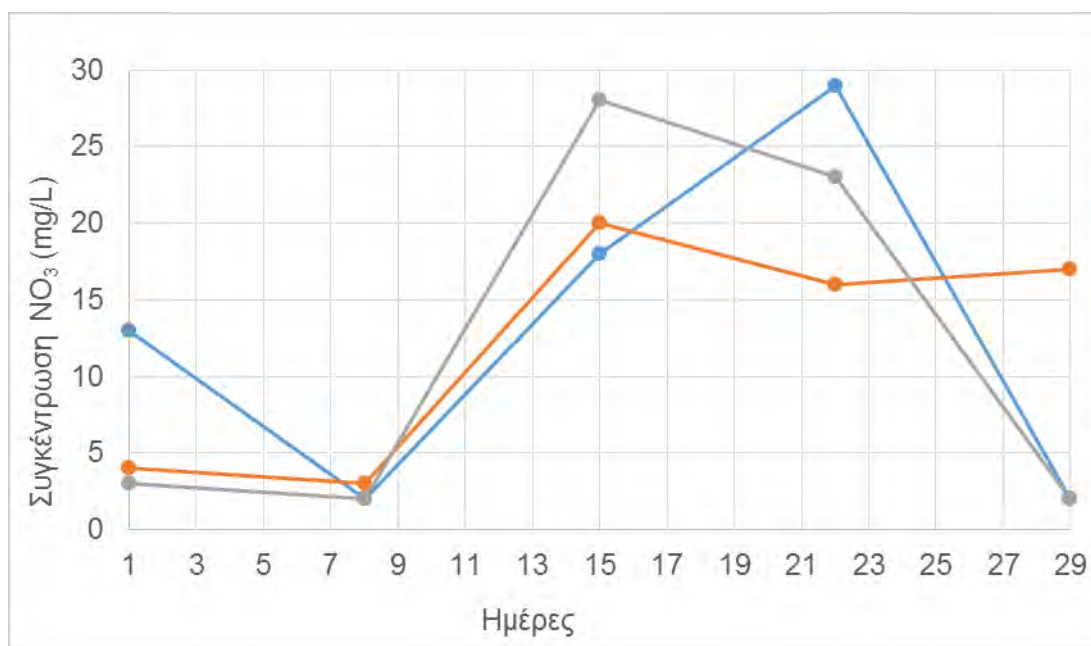
3.2 Μέτρηση της συγκέντρωσης των NO_3 σε θρεπτικά διαλύματα.

Οι μετρήσεις σε τέσσερα διαλύματα που περιέχουν το λίπασμα 14-14-14 με όγκο 100ml έδειξαν ότι η συγκέντρωση των NO_3 παρουσιάζει την ίδια μεταβολή σε σχέση με το χρόνο, ανεξάρτητα από την τιμή του pH του διαλύματος (5,5, 6 και 6,5). Η μεταβολή αυτή της συγκέντρωσης χαρακτηρίζεται σε όλες τις περιπτώσεις από μέγιστες και ελάχιστες τιμές, κατά τις οποίες παρατηρείται και ιζηματοποίηση, οι οποίες είναι διαφορετικές για την κάθε περίπτωση (Διάγραμμα 10). Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάστηκαν στο διάλυμα με pH 5,5 (3100mg/L) και οι ελάχιστες στο διάλυμα με pH 6 (80mg/L). Η συγκέντρωση των NO_3 στο διάλυμα που παρέμεινε στους 18°C παρουσιάζει την ίδια μορφή με αυτή που παρουσιάζει η συγκέντρωση του θρεπτικού στοιχείου σε διάλυμα που παρέμεινε στους 24°C.



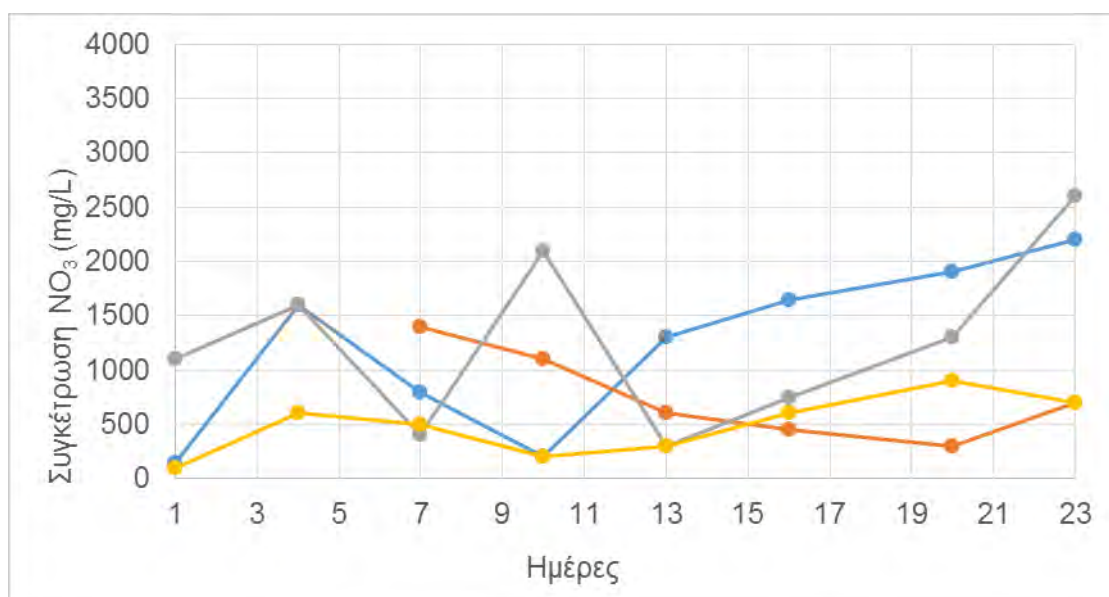
Διάγραμμα 10. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO_3 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (-----), 6,5(-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (----) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Από τις μετρήσεις της συγκέντρωσης των NO_3 σε διαλύματα όγκου 4lt με pH 5,5, 6 και 6,5, παρατηρούμε ότι η μορφή της εξέλιξης στην απελευθέρωση του στοιχείου είναι παρόμοια και στα τρία διαλύματα (Διάγραμμα 11). Τις πρώτες ημέρες δεν παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση του θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα πιθανώς λόγω του μεγάλου όγκου του, ενώ στη συνέχεια υπάρχει αύξηση των τιμών των συγκεντρώσεων των NO_3 σε όλα τα διαλύματα. Το διάλυμα με pH 5,5 παρουσίασε την μεγαλύτερη συγκέντρωση ενώ στη συνέχεια η τιμή του μειώθηκε λόγω ιζηματοποίησης. Για το διάλυμα που το pH είχε τιμή 6 η συγκέντρωση των NO_3 ήταν χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του διαλύματος με pH 5,5. Στη συνέχεια η τιμή αυτή σταθεροποιείται την 15^η ημέρα μέτρησης, που ενδεχομένως να οφείλεται σε μια σχετική σταθεροποίηση του ρυθμού απελευθέρωσης και να συνδέεται με αντίστοιχη πορεία στην τιμή του pH την ίδια χρονική περίοδο (Διάγραμμα 7), καθώς και με όσα αναφέρθηκαν για τα διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14 με όγκο 100ml και pH 5,5 και 6. Ωστόσο η εξέλιξη της συγκέντρωσης του διαλύματος με pH 6,5 παρουσιάζει μια πορεία η οποία δεν συνδέεται ούτε με την μεταβολή του pH, ούτε με τη μεταβολή της συγκέντρωσης των NO_3 στο διάλυμα του λιπάσματος 14-14-14 με όγκο 100ml και pH 6,5.



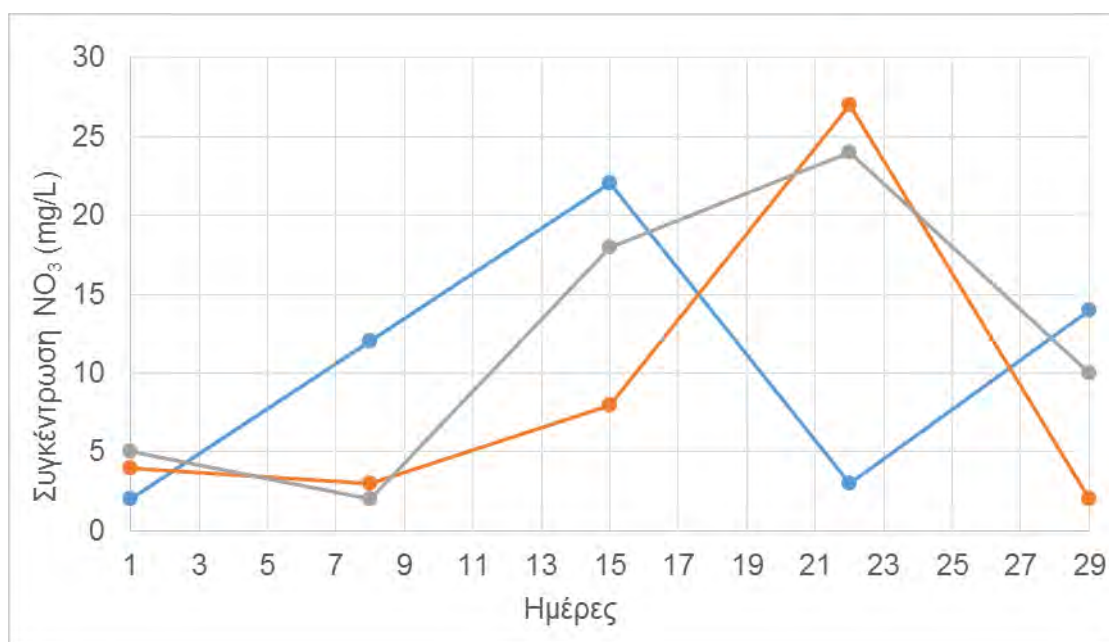
Διάγραμμα 11. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO_3 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C.

Από τις μετρήσεις των τιμών των συγκεντρώσεων των NO_3 σε διαλύματα όγκων 300ml, με διάλυση λιπάσματος 15-7-15 και pH 5,5, 6 και 6,5 διαπιστώνεται ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων του στοιχείου παρουσίασαν μια παρόμοια τάση αυξομείωσης στα διαλύματα με pH 5,5 και 6 στους 24°C, με τη διαφορά ότι το πρώτο διάλυμα παρουσίασε μια χρονική υστέρηση εξέλιξης, η οποία ενδεχομένως να οφείλεται στο χαμηλότερο pH του διαλύματος (Διάγραμμα 12). Οι μέγιστες τιμές (2600mg/L) μετρήθηκαν στο διάλυμα με pH 6 την 23^η ημέρα, το οποίο παρουσίασε και τις πιο έντονες μεταβολές σε σχέση με τα υπόλοιπα διαλύματα. Το διάλυμα που εμφάνισε την πιο ήπια εξέλιξη όσον αφορά τη συγκέντρωση των NO_3 ήταν αυτό με pH 6,5 όπου οι τιμές μεταβάλλονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Επίσης αυτό που φαίνεται από την πορεία της εξέλιξης του διαλύματος με pH 5,5 που δέχεται χαμηλότερη θερμοκρασία (18°C) από την 4^η ημέρα και μετά, είναι μία μείωση στις τιμές των συγκεντρώσεων οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τη χαμηλή θερμοκρασία και εμφανίζουν μεγαλύτερη καθυστέρηση στην απελευθέρωση θρεπτικών λόγω της μείωσης της διαμέτρου των πόρων του υλικού επικάλυψης.



Διάγραμμα 12. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO_3 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (---) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σε τρία διαλύματα όγκου 4lt το καθένα, που περιείχαν λίπασμα 15-7-15 με pH 5,5, 6 και 6,5, παρατηρείται άνοδος στις τιμές των συγκεντρώσεων των NO_3 στο διάλυμα με pH 5,5 από την 1^η ημέρα, σε αντίθεση με τα άλλα δύο διαλύματα με pH 6 και 6,5, για το αντίστοιχο διάστημα (1^η μέχρι 15^η ημέρα) που παρουσιάζουν υστέρηση στον ρυθμό απελευθέρωσης του στοιχείου. Φαίνεται ότι το χαμηλότερο pH στο διάλυμα ευνοεί την γρηγορότερη απελευθέρωση του στοιχείου ωστόσο η συνεχής ρύθμιση του pH του διαλύματος στην τιμή 5,5, προκαλεί συνεχή απελευθέρωση του στοιχείου και τελικά ιζηματοποίηση και επαναδιάλυση του λιπάσματος από την 23^η ημέρα και μετά. Το ίδιο φαινόμενο αλλά με χρονική υστέρηση παρατηρείται και στα διαλύματα με pH 6 και 6,5 όπου όμως οι τιμές των συγκεντρώσεων των NO_3 στα διαλύματα αυτά είναι μεγαλύτερες (27 και 24mg/L αντίστοιχα) σε σχέση με αυτές του διαλύματος με pH 5,5. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης του στοιχείου εμφανίζεται και εδώ στο διάλυμα με pH 6 όπως και παραπάνω στο διάλυμα όγκου 300ml με το ίδιο λίπασμα που σημαίνει ότι αυτό το pH ευνοεί τη διαλυτοποίηση των NO_3 μέσα στον πυρήνα του λιπάσματος (Διάγραμμα 13).



Διάγραμμα 13. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NO_3 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C.

Από τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκέντρωση των NO_3 στα παραπάνω διαλύματα, φαίνεται ότι οι έντονες μεταβολές που παρατηρήθηκαν σε διάλυμα λιπάσματος 14-14-14 με pH 5,5 πιθανώς οφείλονται σε έντονη απελευθέρωση και ιζηματοποίηση του στοιχείου. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να συνδεθεί με τη δυνατότητα ρύθμισης του pH στο διάλυμα και το ρυθμό διάλυσης του πυρήνα του κόκκου. Έτσι, υδατικό διάλυμα με pH 5,5 που έφτασε μέσω των πόρων του υλικού επικάλυψης στον πυρήνα, επέδρασε ταχύτερα στη διάλυσή του, με αποτέλεσμα τη γρήγορη μεταβολή της συγκέντρωσης του θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα. Αντίθετα, υδατικό διάλυμα με pH 6 που έφτασε με τον ίδιο τρόπο στον πυρήνα επέδρασε με μικρότερη ταχύτητα στη διάλυσή του, με αποτέλεσμα την πιο αργή μεταβολή της συγκέντρωσης του θρεπτικού στοιχείου στο διάλυμα. Η χρονική ωστόσο υστέρηση που παρατηρείται στη μεταβολή της συγκέντρωσης του θρεπτικού στοιχείου σε αντίστοιχο διάλυμα που παρέμενε στους 18°C με pH 5,5, οφείλεται μάλλον στη μεταβολή του μεγέθους των πόρων του υλικού επικάλυψης η οποία επηρεάζει και την ταχύτητα διάχυσης NO_3 στο διάλυμα. Σε διαλύματα λιπάσματος 14-14-14 και όγκο 4lt η σταθερή συγκέντρωση των NO_3 τις πρώτες ημέρες οφείλεται πιθανώς στο μεγάλο όγκο τους. Και σε αυτά τα διαλύματα η επίδραση του pH είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται παραπάνω. Η σταθεροποίηση των τιμών στο διάλυμα με pH 6 ενδεχομένως οφείλεται σε μια σχετική σταθεροποίηση του ρυθμού απελευθέρωσης και πιθανώς συνδέεται με αντίστοιχη πορεία στην τιμή του pH την ίδια χρονική περίοδο (Διάγραμμα 7).

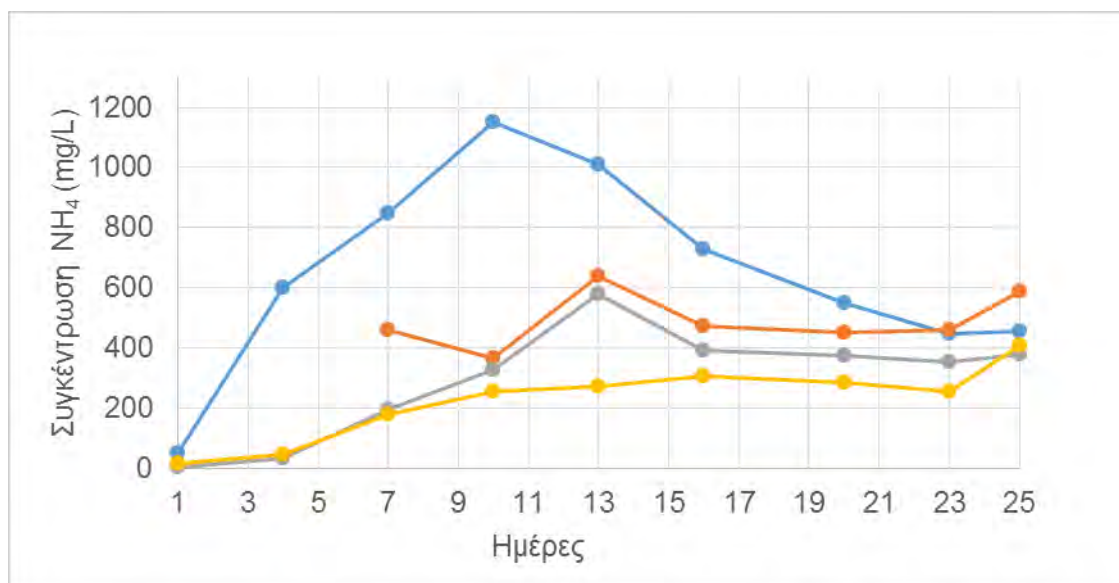
Για τα διαλύματα που προέκυψαν με τη διάλυση του λιπάσματος 15-7-15 με όγκο 300ml, μόνο σε αυτά που είχαν pH 5,5 και 6 και παρέμειναν στους 24°C διαπιστώνεται ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων του στοιχείου είχαν μια παρόμοια μεταβολή. Ωστόσο στο διάλυμα με pH 6 παρουσιάζεται μια υψηλότερη συγκέντρωση NO_3 και μία μεγαλύτερη ταχύτητα διάλυσης του θρεπτικού στοιχείου (Διάγραμμα 12). Το διάλυμα με pH 6,5 παρουσίασε την πιο σταθερή μεταβολή στη συγκέντρωση των NO_3 και τις χαμηλότερες τιμές. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι παρά το φαινόμενο της ιζηματοποίησης που παρατηρείται και εδώ, το λίπασμα κατάφερε μέσω του υλικού επικάλυψης να απελευθερώσει σημαντική ποσότητα NO_3 στο θρεπτικό διάλυμα, όταν η ρύθμιση του pH γίνονταν επιτυχώς σε ένα εύρος τιμών 5,5 έως 6. Η χαμηλή θερμοκρασία επηρέασε και στην περίπτωση αυτή άμεσα τη συγκέντρωση των NO_3 οι οποίες εμφάνισαν μικρότερες τιμές και χρονική υστέρηση εξέλιξης πιθανών λόγω μείωσης της διαμέτρου των πόρων του υλικού επικάλυψης.

Σε διαλύματα λιπάσματος 15-7-15 όγκου 4lt διαπιστώνεται ότι το χαμηλότερο pH του διαλύματος ευνοεί την γρηγορότερη απελευθέρωση του στοιχείου αν και η συνεχής ρύθμιση του pH στην τιμή 5,5, προκαλεί συνεχή απελευθέρωση του στοιχείου και τελικά ιζηματοποίηση

και επαναδιάλυση του λιπάσματος. Το ίδιο φαινόμενο αλλά με χρονική υστέρηση παρατηρείται και στα διαλύματα με pH 6 και 6,5 όπου όμως οι τιμές των συγκεντρώσεων των NO_3 στα διαλύματα αυτά είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του διαλύματος με pH 5,5. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης του στοιχείου εμφανίζεται και εδώ στο διάλυμα με pH 6 όπως και παραπάνω στο διάλυμα όγκου 300ml με το ίδιο λίπασμα που σημαίνει ότι αυτό το pH ευνοεί τη διαλυτοποίηση των NO_3 μέσα στον πυρήνα του λιπάσματος.

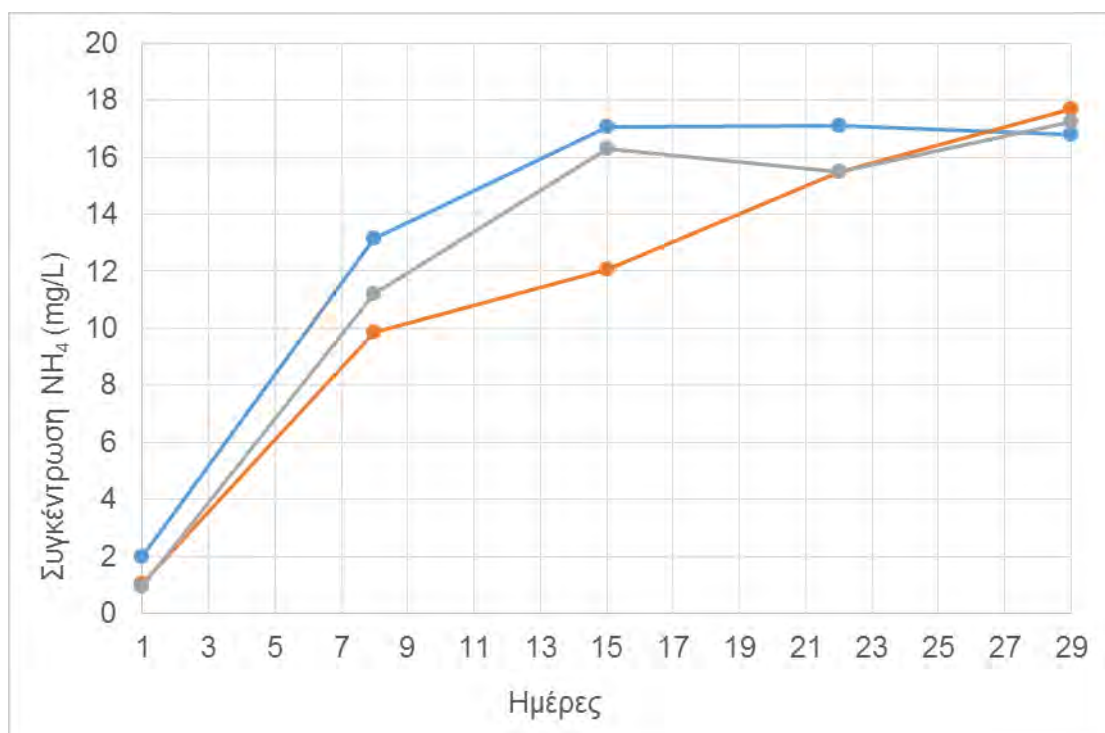
3.3 Μέτρηση της συγκέντρωσης των NH_4 σε θρεπτικά διαλύματα.

Η μεταβολή της συγκέντρωσης των NH_4 , τεσσάρων διαλυμάτων που προέκυψαν από διάλυση ποσότητας 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 έχουν παρόμοια μορφή (Διάγραμμα 14). Το διάλυμα με pH 5,5 εμφανίζει την μεγαλύτερη αύξηση στο ρυθμό απελευθέρωσης των NH_4 , συγκριτικά με τα υπόλοιπα διαλύματα. Η μέγιστη τιμή του διαλύματος αυτού ήταν 1150mg/L τη 10^η ημέρα. Φαίνεται ότι η απελευθέρωση του στοιχείου από τον κόκκο του λιπάσματος ευνοείται στο διάλυμα με το χαμηλότερο pH, όταν αυτή ρυθμίζονταν κοντά στην τιμή-στόχο 5,5. Μετά τη 10^η ημέρα προκαλείται ιζηματοποίηση η οποία δεν επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση της σύγκέντρωσης του στοιχείου στο διάλυμα. Τα διαλύματα με pH 6 και 6,5 παρουσιάζουν μια ήπια μορφή στην εξέλιξή τους με μειωμένες τιμές συγκεντρώσεων σε σχέση με το πρώτο διάλυμα (pH 5,5 στους 24°C) με μία τάση αύξησης των συγκεντρώσεων στο τέλος των μετρήσεων και χωρίς να εμφανίζεται έντονα το φαινόμενο της ιζηματοποίησης. Το διάλυμα με pH 5,5 στους 18°C ακολουθεί την ίδια πορεία εξέλιξης με αυτό που έχει pH 6 στους 24°C. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών μπορεί να έχει το ίδιο αποτέλεσμα στην απελευθέρωση του στοιχείου όπως και η αύξηση του pH του διαλύματος.



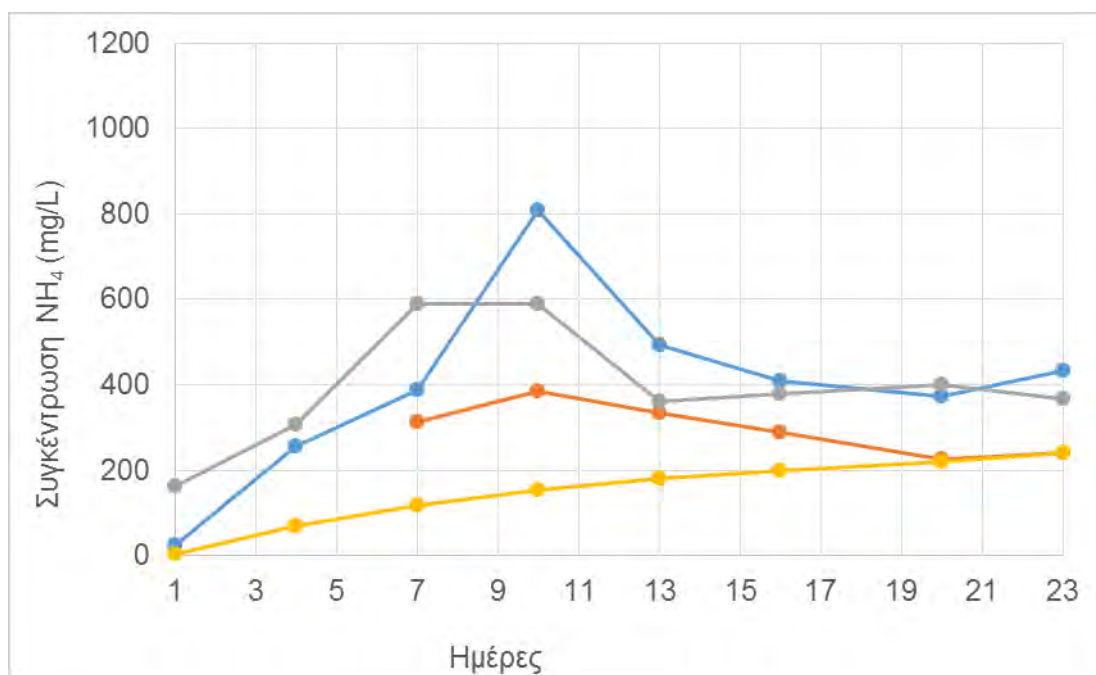
Διάγραμμα 14. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (---) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Από τις μετρήσεις των τιμών των συγκεντρώσεων των NH_4 , σε τρία διαλύματα όγκου 4lt το καθένα, του λιπάσματος 14-14-14, φαίνεται η ίδια εξέλιξη στην απελευθέρωση του στοιχείου καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων (Διάγραμμα 15). Η μεταβολή που ακολουθεί η συγκέντρωση του στοιχείου στο διάλυμα με pH 5,5 είναι η χαρακτηριστική η οποία αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Liang et al., 2006), παρότι το pH του δεν ρυθμιζόταν ικανοποιητικά. Ωστόσο και τα διαλύματα με pH 6 και 6,5 παρουσιάζουν παρόμοια εξέλιξη χωρίς ωστόσο να εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές του διαλύματος με pH 5,5. Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει ότι ο μεγάλος όγκος απέτρεψε την ιζηματοποίηση παρότι τα διαλύματα με pH 5,5 είχαν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων ενώ ο ρυθμός απελευθέρωσης των NH_4 είναι ομαλός παρότι η ρύθμιση του pH του διαλύματος δεν ήταν επιτυχής (Διαγράμματα 7, 8, 9).



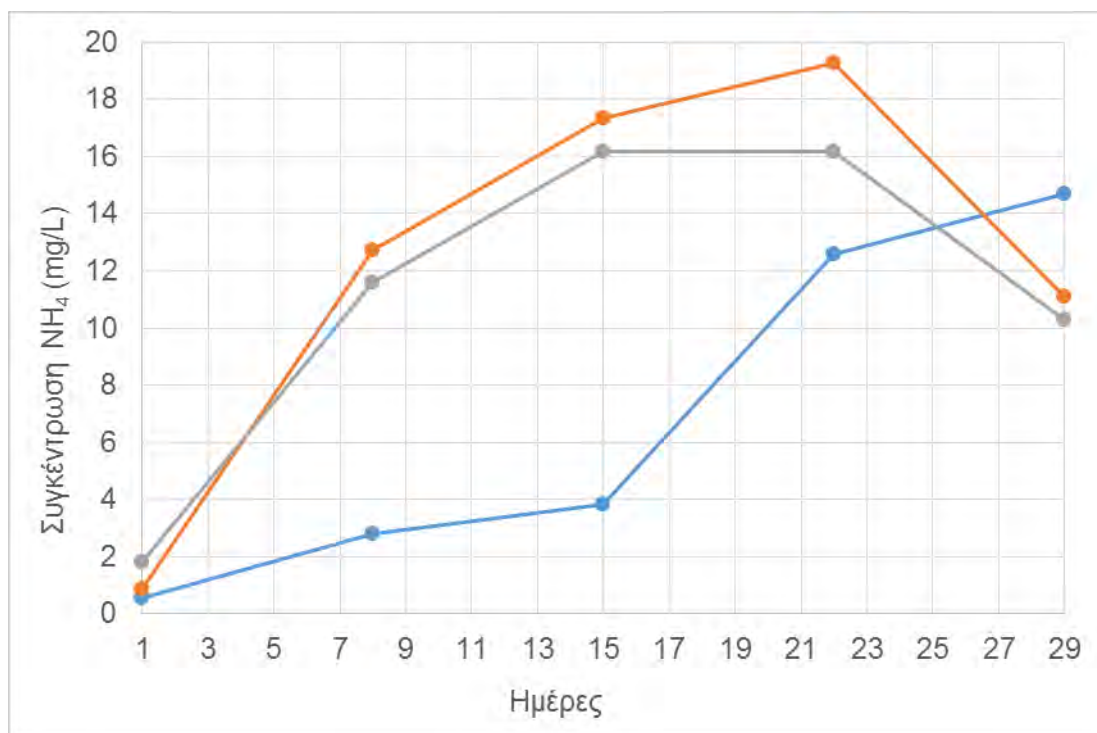
Διάγραμμα 15. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C.

Οι μετρήσεις των τιμών της συγκέντρωσης των NH_4 τεσσάρων διαλυμάτων του λιπάσματος 15-7-15 με όγκο 300ml το καθένα, εμφανίζουν παρόμοια μορφή εξέλιξης στο ρυθμό απελευθέρωσης του στοιχείου (Διάγραμμα 16). Το διάλυμα με pH 5,5 που παραμένει στους 24°C εμφανίζει τη μεγαλύτερη αύξηση στη συγκέντρωση των NH_4 σε σχέση με τα υπόλοιπα διαλύματα, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης λόγω ιζηματοποίησης, το οποίο παρατηρήθηκε και στο διάλυμα του λιπάσματος 14-14-14 με pH 5,5 (Διάγραμμα 14). Η ταχύτερη ωστόσο απελευθέρωση του στοιχείου έγινε στο διάλυμα με pH 6. Από τις μετρήσεις των τιμών των συγκεντρώσεων φαίνεται να ευνοείται η απελευθέρωση των NH_4 στο χαμηλότερο pH σε σχέση με τα άλλα δύο, ενώ τον μικρότερο ρυθμό απελευθέρωσης εμφανίζει το διάλυμα με pH 6,5. Επομένως, η τιμή του pH του διαλύματος επηρεάζει άμεσα τη διαλυτοποίηση του στοιχείου που βρίσκεται στον πυρήνα του λιπάσματος. Στο διάλυμα που έχει τοποθετηθεί στους 18°C με pH 5,5 υπάρχει μια υστέρηση στο ρυθμό απελευθέρωσης λόγω της μεταβολής της διαπερατότητας του υλικού επικάλυψης η οποία είναι μικρότερη στις χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια γίνεται δυσκολότερη η μετακίνηση του διαλύματος από και προς το εσωτερικό του κόκκου.



Διάγραμμα 16. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (-----) από την τέταρτη ημέρα και μετά..

Από τρία διαλύματα, όγκων 4lt το καθένα που περιέχουν 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε pH 5,5, 6 και 6,5, ελήφθησαν μετρήσεις από τις οποίες προκύπτει ότι οι πορείες των διαλυμάτων με pH 6 και 6,5 ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Το διάλυμα με pH 6 εμφάνισε ελάχιστα μεγαλύτερη συγκέντρωση NH_4 σε σχέση με αυτή του διαλύματος με pH 6,5 (Διάγραμμα 17). Τα δύο διαλύματα εμφανίζουν από την αρχή έντονη τάση απελευθέρωσης στοιχείου ενώ από την 23^η ημέρα και μετά παρατηρείται μείωση των τιμών και ιζηματοποίηση. Αντίθετα, το διάλυμα με pH 5,5, οι τιμές των συγκεντρώσεων των NH_4 παρουσίασαν μια αυξητική μορφή χωρίς να παρατηρείται ιζηματοποίηση. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο συνδυασμός του μεγάλου όγκου του διαλύματος και των υψηλών τιμών του pH (6 και 6,5) ευνοούν την απελευθέρωση του στοιχείου, την επίτευξη υψηλών συγκεντρώσεων στο διάλυμα και τελικά την ιζηματοποίηση. Αντίθετα, ο συνδυασμός του μεγάλου όγκου του διαλύματος με ρύθμιση του pH στην τιμή 5,5 ευνοεί την σταδιακή απελευθέρωση του στοιχείου και παρεμποδίζει την ιζηματοποίηση.



Διάγραμμα 17. Μετρήσεις συγκεντρώσεων NH_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 , σε όγκο 4lt αποιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6(---), 6,5(---) σε θερμοκρασία 24°C.

Από τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκέντρωση των NH_4 σε διάλυμα του λιπάσματος 14-14-14, προκύπτει ότι το διάλυμα με pH 5,5 εμφανίζει τον μεγαλύτερο ρυθμό απελευθέρωσης των NH_4 , συγκριτικά με τα υπόλοιπα διαλύματα, ανεξάρτητα από τον όγκο του διαλύματος. Φαίνεται ότι η απελευθέρωση του στοιχείου από τον κόκκο του λιπάσματος ευνοείται σε διάλυμα με το χαμηλότερο pH. Ωστόσο ο μικρός όγκος του διαλύματος μπορεί να ευνοήσει μετέπειτα την ιζηματοποίηση. Τα διαλύματα με pH 6 και 6,5 παρουσιάζουν μια παρόμοια μορφή στην εξέλιξή τους με μειωμένες τιμές συγκεντρώσεων σε σχέση με το πρώτο διάλυμα (pH 5,5 στους 24°C), με μία τάση αύξησης των συγκεντρώσεων στο τέλος των μετρήσεων και χωρίς να εμφανίζεται έντονα το φαινόμενο της ιζηματοποίησης (Διάγραμμα 14, 15).

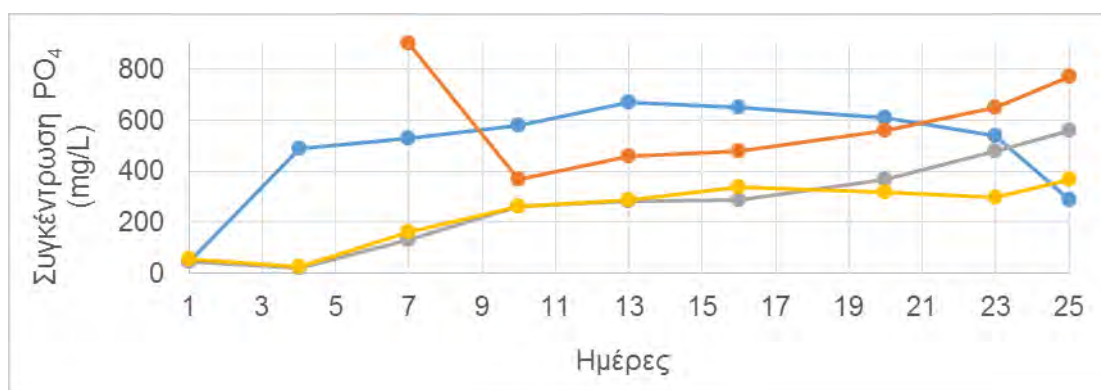
Από τις μεταβολές στη συγκέντρωση των NH_4 στο διάλυμα που τοποθετήθηκε στους 18°C με pH 5,5 φαίνεται ότι η επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών μπορεί να έχει το ίδιο αποτέλεσμα στην απελευθέρωση του στοιχείου, όπως και η αύξηση του pH του διαλύματος από 5,5 σε 6.

Από τις μετρήσεις των τιμών των συγκεντρώσεων σε διαλύματα του λιπάσματος 15-7-15, όγκου 300ml, φαίνεται να ευνοείται η απελευθέρωση των NH_4 στο χαμηλότερο pH σε σχέση με τα άλλα δύο, ενώ τον ταχύτερο ρυθμό διαλυτοποίησης εμφανίζει το διάλυμα με pH 6 και τον μικρότερο αυτό με pH 6,5 (Διάγραμμα 16). Η επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας (18°C) σε διάλυμα με pH 5,5 είναι παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε και στην περίπτωση του διαλύματος με λίπασμα 14-14-14 όγκου 100ml.

Σε διαλύματα όγκου 4lt από το λίπασμα 15-7-15 διαπιστώνεται ότι η τιμή του pH από 6 έως 6,5 ευνοεί τη γρήγορη απελευθέρωση NH_4 όπως και στην περίπτωση του του διαλύματος με λίπασμα 14-14-14 όγκου 4lt αλλά και την ιζηματοποίηση, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στο προηγούμενο διάλυμα (Διάγραμμα 15). Αντίθετα, ένα pH με τιμή 5,5 είχε σαν αποτέλεσμα την καλύτερη συμπεριφορά του λιπάσματος είτε λόγω σταδιακής απελευθέρωσης και μη ιζηματοποίησης, όπως στην περίπτωση του διαλύματος με λίπασμα 15-7-15 (Διάγραμμα 17), είτε λόγω γρήγορης απελευθέρωσης χωρίς να παρατηρηθεί ιζηματοποίηση, όπως στην περίπτωση του διαλύματος με λίπασμα 14-14-14 (Διάγραμμα 15).

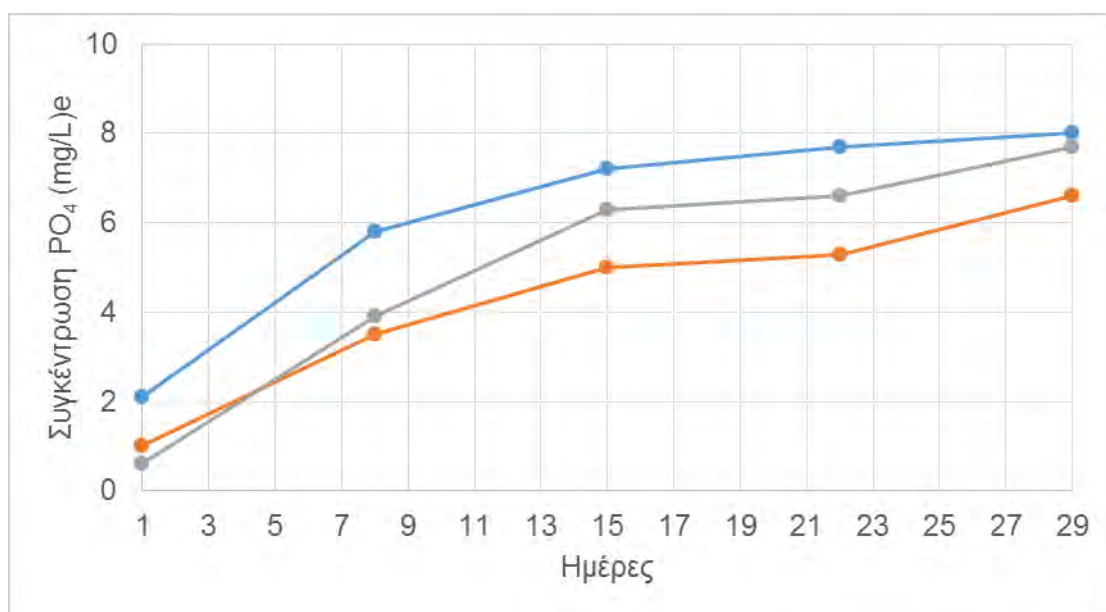
3.4 Μέτρηση της συγκέντρωσης των PO_4 σε θρεπτικά διαλύματα.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν από τέσσερα διαλύματα όγκου 100ml μετά από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 παρουσιάζουν τη μεταβολή στο Διάγραμμα 18. Το διάλυμα με pH 5,5 που παρέμεινε στους 24°C εμφανίζει τη μεγαλύτερη αύξηση στις τιμές της συγκέντρωσης των PO_4 καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων, σε σχέση με τα υπόλοιπα διαλύματα. Η γρήγορη εισχώρηση του διαλύματος με χαμηλό pH στο εσωτερικό του κόκκου στην περίπτωση αυτή δεν συνεπάγεται και τη διαλυτοποίηση όλων των μορφών με τις οποίες έχει δεσμευτεί ο P στον πυρήνα του κόκκου. Το χαμηλότερο pH του διαλύματος φαίνεται ότι ευνοεί τη γρηγορότερη απελευθέρωση των PO_4 με μορφή H_2PO_4 . Βέβαια, στο ίδιο διάλυμα παρατηρείται ιζηματοποίηση από την 23^η ημέρα και μετά, η οποία ενδεχομένως να οφείλεται σε συνένωση του στοιχείου. Για τα άλλα δύο διαλύματα με pH 6 και 6,5 μετρήθηκαν παρόμοιες τιμές στις συγκεντρώσεις των PO_4 , με συνεχώς αυξητική πορεία μέχρι το τέλος των μετρήσεων. Φαίνεται ότι όταν το pH του διαλύματος είναι μεταξύ των τιμών 6 και 6,5 ο ρυθμός απελευθέρωσης ακολουθεί μία πιο αργή πορεία, αλλά χωρίς να εμφανίζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης, ιδιαίτερα στο υψηλότερο pH (6,5), φαινόμενο που παρατηρείται και για τα διαλύματα λιπασμάτων 14-14-14 και 15-7-15 για το ίδιο pH στα Διαγράμματα 10, 12, 14 και 16. Παρόμοια μεταβολή με αυτή που περιγράφεται για τα διαλύματα με pH 6 και 6,5 εμφανίζει και το διάλυμα με pH 5,5, το οποίο τοποθετήθηκε στους 18°C, χωρίς επίσης να εμφανίζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης κατά την τελευταία μέρα των μετρήσεων, παρότι η συγκέντρωση του στοιχείου ξεπέρασε αυτή στην οποία εμφανίστηκε ιζηματοποίηση στο διάλυμα με pH 5,5.



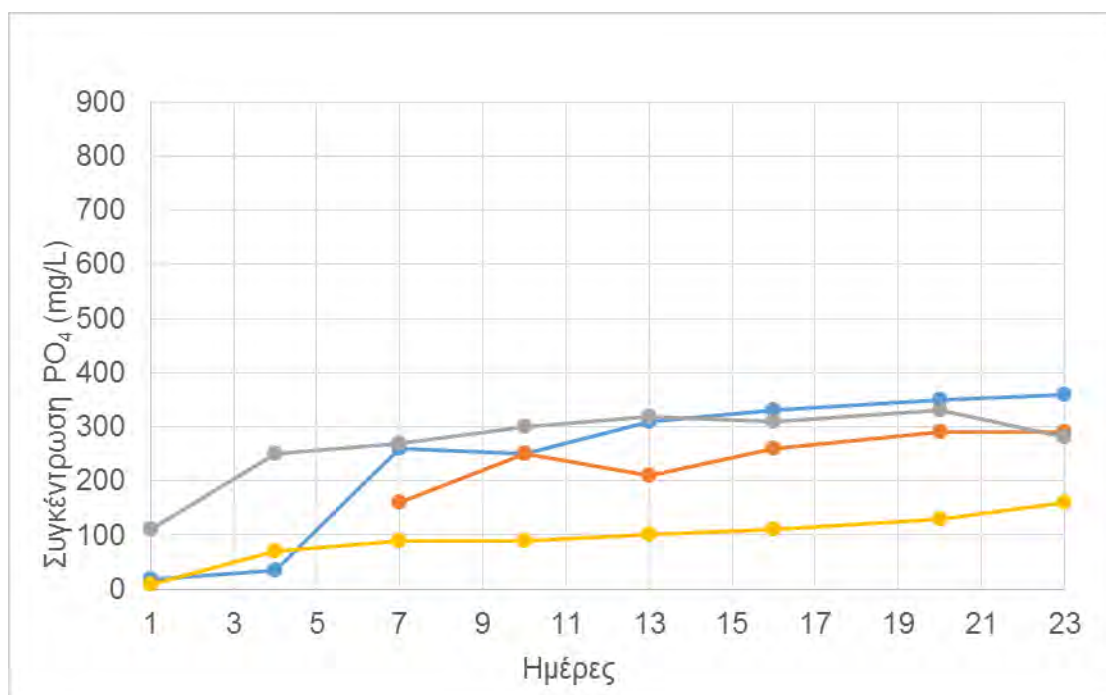
Διάγραμμα 18. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (---) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Όπως διαπιστώνεται από τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των PO_4 σε διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14 όγκου 4lt, οι τιμές της συγκέντρωσης του στοιχείου παρουσιάζουν την ίδια πορεία εξέλιξης με τις υψηλότερες απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεων να εμφανίζονται στο διάλυμα με pH 5,5, για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Διάγραμμα 19). Εξαίρεση αποτελεί η 29^η ημέρα όπου τελικά και η τιμή της συγκέντρωσης των PO_4 του διαλύματος με pH 6,5 αποκτά την ίδια μέγιστη τιμή. Ωστόσο φαίνεται ότι μέχρι την 15^η ημέρα σε όλα τα διαλύματα παρουσιάζεται ένας γρήγορος ρυθμός απελευθέρωσης στοιχείου ο οποίος μειώνεται από την 15^η ημέρα και μετά. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το χαμηλότερο pH ευνοεί και πάλι τον μεγαλύτερο ρυθμό απελευθέρωσης του στοιχείου όπως διαπιστώθηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Επιπλέον σε κανένα διάλυμα δεν παρατηρήθηκε μείωση της συγκέντρωσης και πιθανή ιζηματοποίηση, ίσως λόγω του μεγάλου όγκου του διαλύματος. Ειδικά για το διάλυμα με pH 5,5 η παρεμπόδιση της ιζηματοποίησης που παρατηρήθηκε σε αντίστοιχο διάλυμα μικρότερου όγκου 100ml αποτελεί ένα θετικό στοιχείο σχετικά με τη διαχείριση του λιπάσματος.



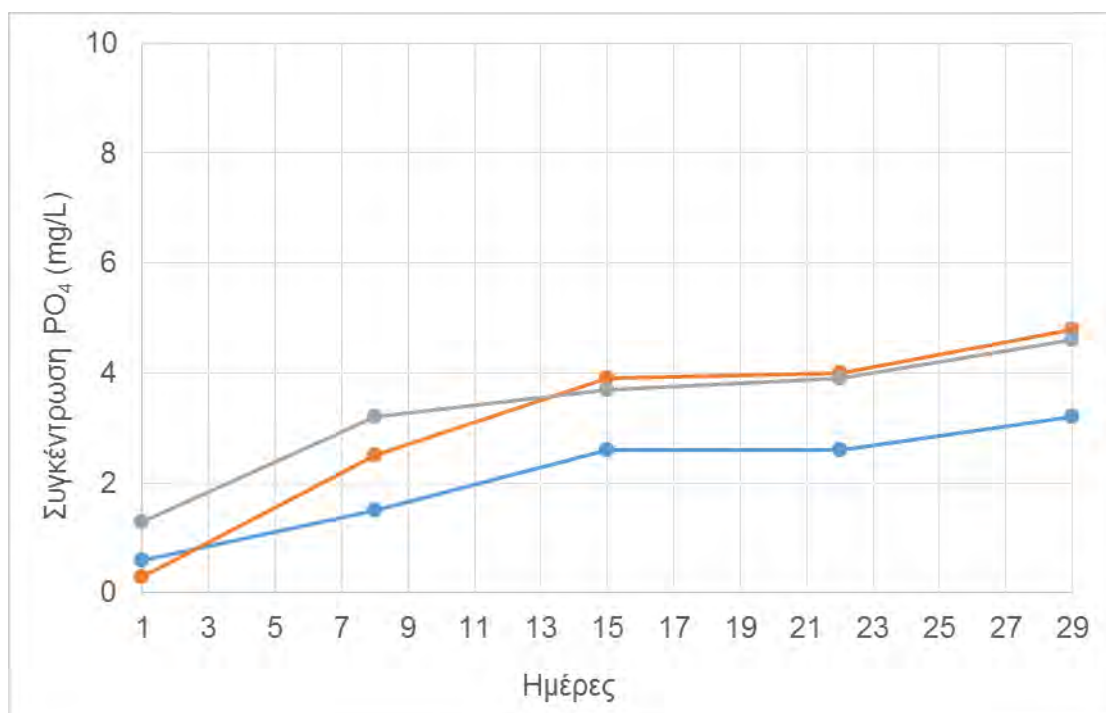
Διάγραμμα 19. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (---), 6,5 (---) σε θερμοκρασία 24°C.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σε τέσσερα διαλύματα όγκου 300ml το καθένα το οποία περιέχουν λίπασμα 15-7-15 διαπιστώνεται ότι η μορφή της εξέλιξής τους είναι παρόμοια, με τις μεγαλύτερες τιμές στις συγκεντρώσεις των PO_4 να εμφανίζονται στα διαλύματα με pH 5,5 και 6 (Διάγραμμα 20). Το διάλυμα με pH 6 εμφανίζει την γρηγορότερη απελευθέρωση των PO_4 με τάση μείωσης της συγκέντρωσης (πιθανή συνένωση) μετά την 20^η ημέρα από την παρασκευή του. Επίσης το διάλυμα με χαμηλότερο pH έχει μια χρονική υστέρηση στη διαλυτοποίηση του στοιχείου σε αντίθεση με αυτό με pH 6. Την ίδια εξέλιξη με το διάλυμα που παρέμενε στους 24°C ακολουθεί και το διάλυμα με pH 5,5 που τοποθετήθηκε στους 18°C, με πιο έντονη όμως τη χρονική υστέρηση λόγω της επίδρασης της χαμηλής θερμοκρασίας στην είσοδο του διαλύματος στον πυρήνα του λιπάσματος. Η επίδραση αυτή αφορά τη μεταβολή της διαμέτρου των πόρων του υλικού επικάλυψης. Το διάλυμα με pH 6,5 παρουσιάζει τις πιο χαμηλές τιμές συγκέντρωσης PO_4 , όπως και σε προηγούμενα διαλύματα για πολλά στοιχεία (Διαγράμματα 10,12,14,16). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι και στην περίπτωση αυτή το pH του διαλύματος μπορεί να παίζει ρόλο ρυθμιστικό ενδεχομένως καλύτερο από ότι η θερμοκρασία του διαλύματος.



Διάγραμμα 20. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (---) από την τέταρτη ημέρα και μετά..

Οι μετρήσεις που έγιναν σε τρία διαλύματα 4lt το καθένα, μετά από διάλυση λιπάσματος 15-7-15, δείχνουν ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων διαφέρουν ελάχιστα στα διαλύματα με pH 5,5 όπου η τιμή κυμάνθηκε από 0,6 έως 3,2mg/L, pH 6 όπου η τιμή κυμάνθηκε από 0,3 έως 4,8mg/L και pH 6,5 όπου η τιμή κυμάνθηκε από 1,3 έως 4,6mg/L (Διάγραμμα 21). Συγκεκριμένα, για τα διαλύματα με pH 6 και 6,5 δεν παρατηρούνται σχεδόν καθόλου διαφορές ως προς την εξέλιξη της συγκέντρωσης των PO_4 , ενώ φαίνεται ότι αυτές οι τιμές του pH ευνοούν περισσότερο τη διαλυτοποίηση του λιπάσματος. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 17 για την περίπτωση των NH_4 , όταν η τιμή του pH του διαλύματος είναι μεταξύ 6 και 6,5 παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός απελευθέρωσης των PO_4 στο διάλυμα. Ωστόσο στην περίπτωση των PO_4 θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εμφανίζεται καθόλου το φαινόμενο της ιζηματοποίησης.



Διάγραμμα 21. Μετρήσεις συγκεντρώσεων PO_4 σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (---), 6,5 (---) σε θερμοκρασία 24°C.

Μετά από μετρήσεις που ελήφθησαν από διαλύματα 14-14-14 διαπιστώνεται ότι, το χαμηλότερο pH (5,5) του διαλύματος ευνοεί τη γρηγορότερη απελευθέρωση των PO_4 , ανεξαρτήτως όγκου, αφού πιθανώς να επιτρέπει τη γρήγορη εισχώρηση του διαλύματος στον πυρήνα του κόκκου του λιπάσματος, την άμεση διαλυτοποίηση του στοιχείου και τη διάχυσή του στο θρεπτικό διάλυμα. Η ρύθμιση του pH στην τιμή 5,5 (για διαλύματα του ίδιου όγκου) ευνοεί εξίσου την απελευθέρωση NO_3 και NH_4 (Διαγράμματα 10,16). Όταν το pH του διαλύματος είναι μεταξύ των τιμών 6 και 6,5 ο ρυθμός απελευθέρωσης ακολουθεί πιο αργή πορεία αλλά χωρίς να εμφανίζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης σε κανένα από τα διαλύματα αυτού του λιπάσματος που μελετήθηκαν. Από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 18, φαίνεται ότι το pH αποτελεί ισχυρότερο παράγοντα ο οποίος καθορίζει τον τρόπο που θα λειτουργήσει ο μηχανισμός απελευθέρωσης του στοιχείου από τον κόκκο του λιπάσματος, σε σχέση με τη θερμοκρασία η οποία καθορίζει το ρυθμό απελευθέρωσης και την ιζηματοποίηση.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σε διαλύματα του λιπάσματος 15-7-15 προκύπτει ότι το διάλυμα με χαμηλότερο pH (5,5) έχει μια χρονική υστέρηση στη διαλυτοποίηση του στοιχείου σε αντίθεση με αυτό με pH 6 χωρίς ωστόσο να παρουσιάζονται στη συνέχεια διαφορές μεταξύ των δύο διαλυμάτων, τόσο ως προς το ρυθμό απελευθέρωσης όσο και ως προς τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων. Κατά συνέπεια ρύθμιση του pH σε τιμές από 5,5 έως 6 δεν φαίνεται να επηρεάζουν την απελευθέρωση των PO_4 , παρά το μικρό όγκο του διαλύματος. Η ρύθμιση του pH σε αυτές τις τιμές (για διαλύματα του ίδιου όγκου) ευνοεί εξίσου την απελευθέρωση NO_3 και NH_4 (Διαγράμματα 10,16). Το διάλυμα με pH 6,5 φαίνεται ότι περιορίζει σημαντικά την απελευθέρωση στοιχείου καθώς παρουσιάζει τις πιο χαμηλές τιμές στη συγκέντρωση του στοιχείου, σε σχέση με τα υπόλοιπα που σημαίνει ότι σε αυτή την περίπτωση το pH του διαλύματος παίζει ρόλο ρυθμιστικό.

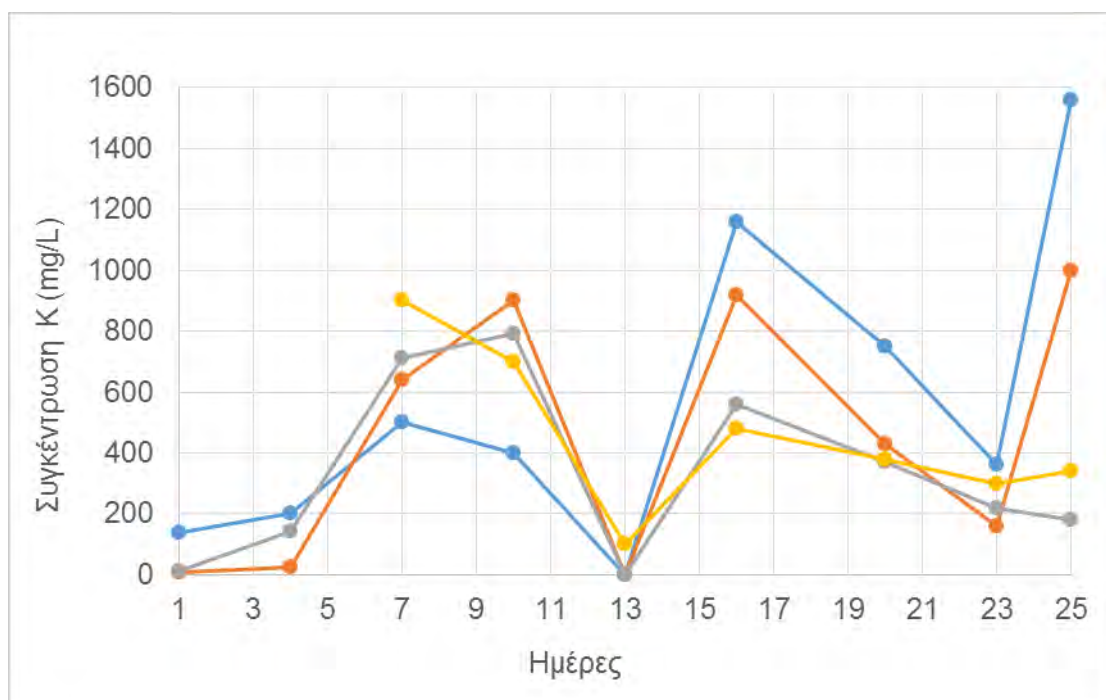
Από τα Διαγράμματα 19 και 21 φαίνεται ότι για μεγαλύτερους όγκους διαλυμάτων τόσο για το λίπασμα 14-14-14 όσο και για το λίπασμα 15-7-15 καθώς ήταν ανεπιτυχής η ρύθμισή του pH περιορίζεται σημαντικά η σημασία του pH στην απελευθέρωση PO_4 , στα συγκεκριμένα διαλύματα οπότε το εύρος τιμών του pH ήταν μεγάλο. Οπότε οι μετρήσεις των PO_4 μπορεί να προέρχονται και από H_2PO_4 ή και HPO_4 .

Στο διάλυμα λιπάσματος 15-7-15 και όγκο 4lt στο οποίο το pH ρυθμίζονταν επιτυχώς σε τιμή 5,5 παρατηρείται μειωμένη συγκέντρωση PO_4 πιθανώς γιατί αυτά μπορούν προέλθουν μόνο από τη μορφή H_2PO_4 . Αντίθετα σε διαλύματα (λιπασμάτων 14-14-14 και 15-7-15) όπου δεν ρυθμίζονταν επιτυχώς το pH το οποίο κυμαίνονταν από 5,5 έως 7, η τιμή της συγκέντρωσης

των PO_4 ήταν υψηλή πιθανώς γιατί αυτά μπορούν προέλθουν και από άλλες μορφές (H_2PO_4 και HPO_4).

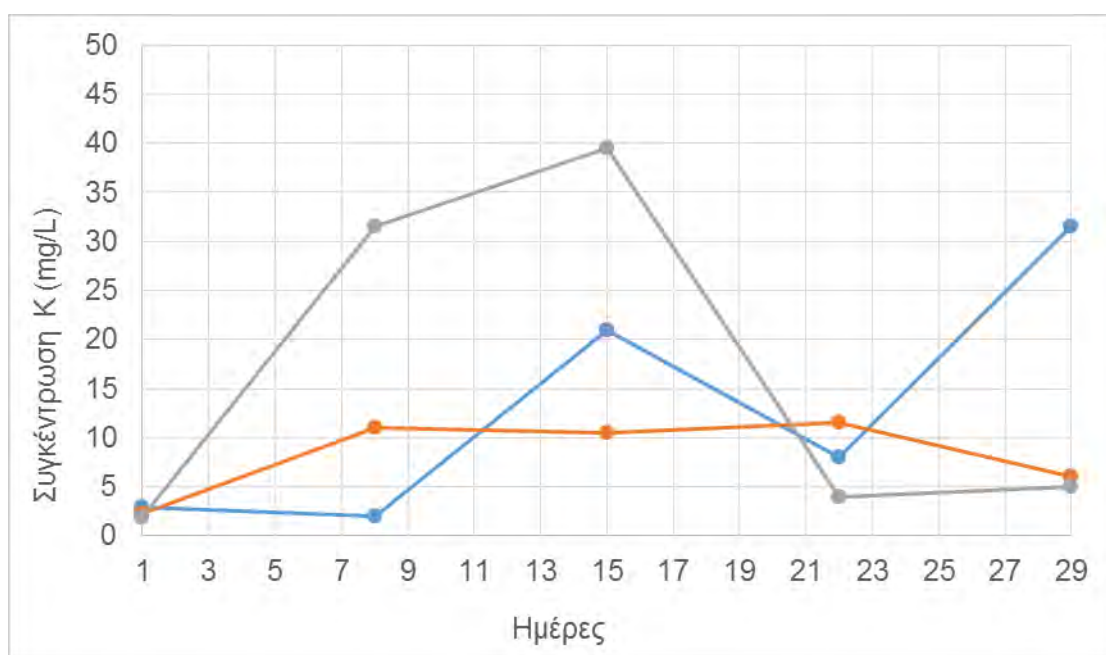
3.5 Μέτρηση της συγκέντρωσης του Κ σε θρεπτικό διάλυμα.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν σε τέσσερα διαλύματα όγκου 100ml το καθένα, του λιπάσματος 14-14-14, παρατηρείται παρόμοια μορφή μεταβολής της συγκέντρωσης του Κ, σε όλα τα διαλύματα που είχαν διαφορετικό pH, με έντονες αυξομειώσεις στις τιμές καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων (Διάγραμμα 22). Το διάλυμα με pH 5,5, στους 24°C, παρουσίασε τελικά τη μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης του στοιχείου σε σχέση με τα υπόλοιπα διαλύματα συναρτήσει του χρόνου, παρόλο που μέχρι την 10^η ημέρα έχει το μικρότερο ρυθμό απελευθέρωσης. Το διάλυμα με pH 5,5 το οποίο παρέμεινε στους 18°C εμφανίζει παρόμοια μορφή εξέλιξης με αυτή του διαλύματος με pH 6,5. Φαίνεται επίσης ότι κατά τη 13^η ημέρα από την παρασκευή του διαλύματος, παρατηρείται μία έντονη μείωση της συγκέντρωσης ανεξάρτητα από την τιμή του pH του διαλύματος, πιθανώς λόγω συνένωσης του Κ με κάποιο άλλο στοιχείο. Επίσης παρατηρείται η επαναληψιμότητα του φαινομένου περίπου ανά 10 ημέρες.



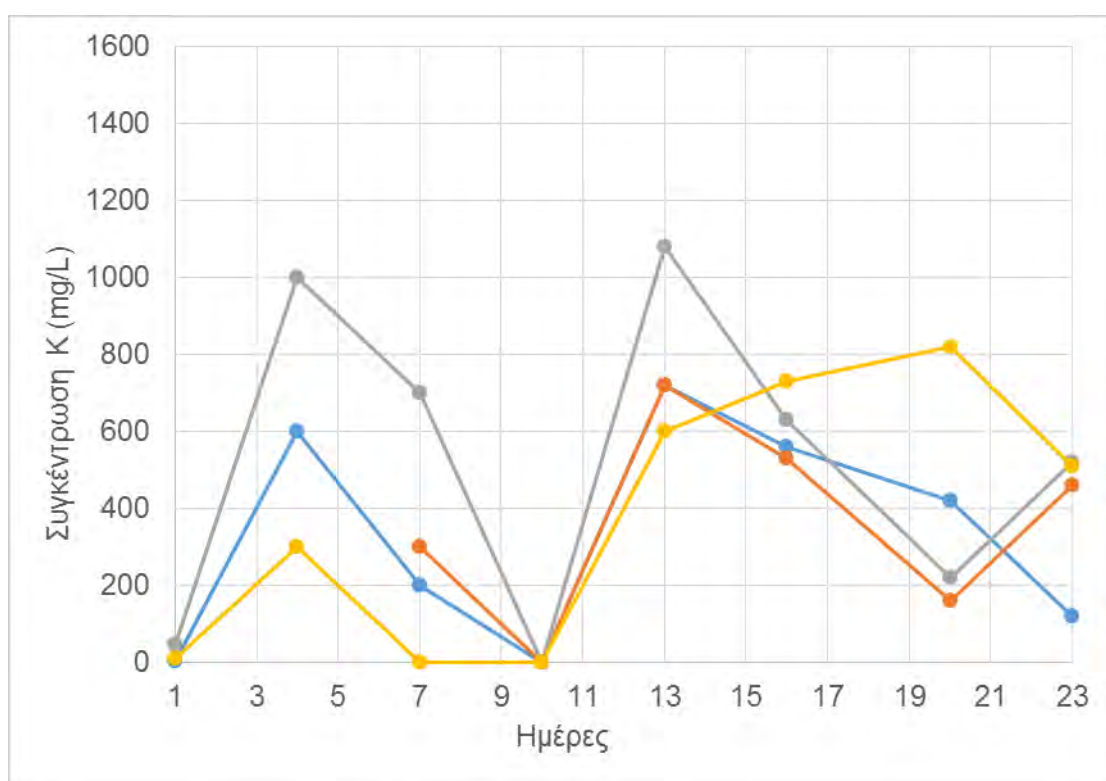
Διάγραμμα 22. Μετρήσεις συγκεντρώσεων Κ σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε όγκο 100ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (---), 6 (---), 6,5 (---) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (---) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Όπως διαπιστώνεται από τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων του Κ σε διαλύματα όγκου 4lt του λιπάσματος 14-14-14, τα διαλύματα με pH 5,5 και 6,5 παρουσιάζουν την ίδια εξέλιξη με αυτή που περιγράφηκε και στο παραπάνω Διάγραμμα 22. Χαρακτηριστική είναι και εδώ η γρήγορη απελευθέρωση του στοιχείου σε υψηλό pH και η υστέρηση σε χαμηλότερο, όπως και η κοινή ημέρα κατά την οποία εμφανίζεται μείωση της συγκέντρωσης και πιθανή ιζηματοποίηση. Επίσης χαρακτηριστική είναι και η αναστροφή στην εξέλιξη των συγκεντρώσεων μετά την ημέρα κατά την οποία εμφανίζεται η μικρότερη τιμή (ιζηματοποίηση) (Διάγραμμα 23). Αντίθετα το διάλυμα με pH 6 παρουσιάζει μικρότερη απελευθέρωση, μικρότερες τιμές συγκεντρώσεων και σταθερότητα. Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 23 και 7 προκύπτει ότι μία αύξηση της τιμής του pH στο διάλυμα που αρχικά ρυθμίστηκε στην τιμή 5,5, προκαλεί μείωση της συγκέντρωσης του Κ στο διάλυμα. Επίσης συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 22,23 και 11 διαπιστώνεται ότι, όταν έχουμε αύξηση της συγκέντρωσης του Κ η τιμή των NO_3 μειώνεται.



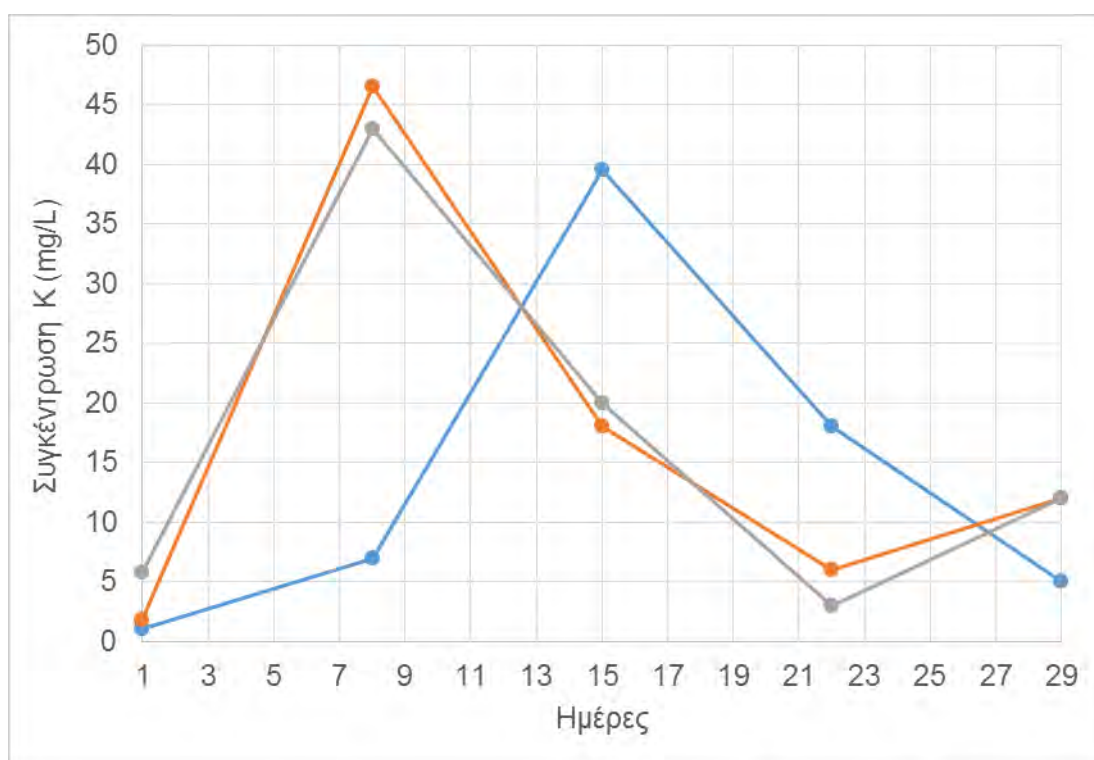
Διάγραμμα 23. Μετρήσεις συγκεντρώσεων Κ σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (---), 6,5 (---) σε θερμοκρασία 24°C.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σε τέσσερα διαλύματα όγκου 300ml το καθένα το οποία περιέχουν λίπασμα 15-7-15 διαπιστώνεται ότι έχουν παρόμοια μορφή εξέλιξης με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να εμφανίζονται στο διάλυμα με pH 6 και οι μικρότερες στο διάλυμα με pH 6,5. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων του K μετρώνται χρονικά τις ίδιες στιγμές σε όλα τα διαλύματα όπως και στην περίπτωση του λιπάσματος 14-14-14(Διάγραμμα 22). Παρόμοια μορφή εξέλιξης έχει και το διάλυμα με pH 5,5 στους 18°C το οποίο μάλιστα δεν διαφέρει στις τιμές του από το διάλυμα με pH 5,5 στους 24°C. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι διάλυμα με pH 6 ευνοεί την άμεση απελευθέρωση του K ενώ η θερμοκρασία του διαλύματος δεν επιδρά στον ρυθμό απελευθέρωσης. Και στην περίπτωση αυτή όπως και στο διάλυμα των 100ml του λιπάσματος 14-14-14 παρατηρείται επαναληψιμότητα του φαινομένου περίπου ανά 10 ημέρες.



Διάγραμμα 24. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τέσσερα διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε όγκο 300ml απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH σε τιμές 5,5 (----), 6 (-----), 6,5 (-----) σε θερμοκρασία 24°C τα τρία, ενώ το τέταρτο τοποθετήθηκε στους 18°C, σε pH 5,5 (----) από την τέταρτη ημέρα και μετά.

Οι μετρήσεις που έγιναν σε τρία διαλύματα 4lt το καθένα, μετά από διάλυση λιπάσματος 15-7-15, δείχνουν ότι οι μεταβολές στη συγκέντρωση του στοιχείου ακολουθούν παρόμοια μορφή (Διάγραμμα 25). Στα διαλύματα με pH 6 και 6,5 ευνοείται περισσότερο η άμεση απευθέρωση του K, τις πρώτες ημέρες, σε σχέση με το διάλυμα που έχει χαμηλότερο pH 5,5 το οποίο υστερεί χρονικά. Τη μέγιστη τιμή εμφανίζει το διάλυμα με pH 6. Επίσης και στα τρία διαλύματα παρουσιάζεται το φαινόμενο της ιζηματοποίησης, πιθανά λόγω συνένωσης του K με κάποιο άλλο στοιχείο. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το υψηλό pH στο διάλυμα ευνοεί την άμεση απελευθέρωση, ενώ παρότι έχουμε διαλύματα με μεγάλους όγκους, φαίνεται να υπάρχει ιζηματοποίηση.



Διάγραμμα 25. Μετρήσεις συγκεντρώσεων K σε τρία διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15, σε όγκο 4lt απιονισμένου νερού έκαστο, με συνεχή διόρθωση του pH με τιμή-στόχο 5,5 (---), 6 (---), 6,5 (---) σε θερμοκρασία 24°C.

Μετά από μετρήσεις που ελήφθησαν από διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14, όγκου 100ml φαίνεται ότι, όταν η τιμή του pH είναι 6 ευνοείται η άμεση απελευθέρωση του Κ. Στο διάλυμα αυτό μετά την έντονη ιζηματοποίηση του λιπάσματος η μείωση της τιμής του pH σε 5,5 φαίνεται να ευνοεί την επαναδιαλυτοποίηση του ιζηματοποιημένου στοιχείου, με αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσής του στο θρεπτικό διάλυμα. Αυτή η στρατηγική μεταβολής του pH μπορεί να αποτελέσει στοιχείο διαχείρισης του λιπάσματος όπως και η παρόμοια συμπεριφορά που αυτό έχει σε χαμηλή θερμοκρασία συγκριτικά με αυτό με υψηλότερο pH (6,5).

Και στην περίπτωση του διαλύματος του λιπάσματος 14-14-14, όγκου 4lt παρατηρείται γρήγορη απελευθέρωση του Κ σε pH 6,5 και μία υστέρηση απελευθέρωσης σε pH 5,5. Επίσης, εμφανίζεται η κοινή ημέρα κατά την οποία παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης και πιθανή ιζηματοποίηση, όπως χαρακτηριστική και η αναστροφή στην εξέλιξη των συγκεντρώσεων μετά την ημέρα της εμφάνισης της χαμηλότερης συγκέντρωσης.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σε διαλύματα του λιπάσματος 15-7-15 προκύπτει ότι διάλυμα με pH 6 ευνοεί την άμεση απελευθέρωση του Κ, ανεξαρτήτως όγκου, ενώ παρουσιάζει την εντονότερη τάση ιζηματοποίησης. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγάλου ρυθμού απελευθέρωσης του στοιχείου και της πιθανής συνένωσής του με άλλο στο διάλυμα, ενώ η θερμοκρασία του διαλύματος δεν φαίνεται να επιδρά στον ρυθμό απελευθέρωσης.

3.6 Ανάπτυξη μαθηματικού προσομοιώματος εκτίμησης της συγκέντρωσης των NO_3 , NH_4 , PO_4 και K σε θρεπτικά διαλύματα που παρασκευάστηκαν με χρήση CRF λιπασμάτων.

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων προκύπτει ότι η τιμή του pH, ο χρόνος από την παρασκευή του διαλύματος, ο όγκος του αρχικού διαλύματος καθώς και ο αφαιρούμενος με κάθε δειγματοληψία όγκος διαλύματος επηρεάζει τη συγκέντρωση των NO_3 , NH_4 , K , PO_4 στο θρεπτικό διάλυμα. Συγκεκριμένα :

- i) Το pH του υδατικού διαλύματος επιδρά καθοριστικά στο ρυθμό απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων σε όλα τα διαλύματα που παρασκευάστηκαν από τα δύο λιπάσματα 14-14-14 και 15-7-15. Για παράδειγμα όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11 που αφορούσε τη μεταβολή της συγκέντρωσης των NO_3 σε διαλύματα που προέκυψαν από το λίπασμα 14-14-14, αυτό με pH 5,5 εμφάνισε μεγαλύτερη συγκέντρωση NO_3 σε σχέση με τα διαλύματα που είχαν pH 6 και 6,5. Η επίδραση του pH απεικονίζεται και στο Διάγραμμα 15 που αφορά μεταβολές στις συγκεντρώσεις των NH_4 , όπου είχε παρατηρηθεί μεγαλύτερη αύξηση συγκέντρωσης στο διάλυμα με pH 5,5 σε σχέση με τα άλλα δύο διαλύματα με pH 6 και 6,5. Χαρακτηριστικό επίσης παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση που περιγράφεται στα Διαγράμματα 23 και 7 απ' όπου προκύπτει ότι μία αύξηση της τιμής του pH προκαλεί μείωση της συγκέντρωσης του K στο διάλυμα.
- ii) Ο όγκος του αρχικού διαλύματος επηρεάζει τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων, καθώς φαίνεται ότι η συμπεριφορά των διαλυμάτων είναι διαφορετική στα πυκνά διαλύματα (100 και 300ml) σε σχέση με τα αραιά (4lt), καθώς και ο όγκος του νερού που αφαιρείται κάθε φορά για τις ανάγκες των μετρήσεων. Για παράδειγμα, στα διαγράμματα 15 και 16 παρατηρούμε ότι στα πυκνά διαλύματα (100ml) η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων είναι πιο άμεση σε σχέση με τα αραιά (4lt).
- iii) Ο χρόνος που απαιτείται για την απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων είναι διαφορετικός στα πυκνά διαλύματα σε σχέση με τα αραιά, σε συνάρτηση όμως με τον όγκο του αρχικού διαλύματος και το pH των διαλυμάτων, καθώς διαπιστώσαμε παρόμοια μορφή στις καμπύλες των πυκνών (100 και 300ml) και των αραιών διαλυμάτων (4lt) .

Η θερμοκρασία είναι πολύ σημαντικός παράγοντας που γνωρίζουμε ότι επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων (Liang et al., 2006; Wang et al., 2011). Για αυτό το λόγο τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε δύο σταθερές θερμοκρασίες στους 24°C και

στους 18°C. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με πληροφορίες της εταιρείας Haifa Chemicals L.t.d, η οποία ήταν και ο προμηθευτής των λιπασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν πείραμα, η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί επιβράδυνση της απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων όταν τα λιπάσματα μελετήθηκαν σε εδαφικά διαλύματα. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τα Διαγράμματα 10, 12, 14 όπου φαίνεται η υστέρηση στην απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων του διαλύματος που τοποθετήθηκε στους 18°C σε σχέση με αυτό που παρέμεινε στους 24°C.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εκτίμηση της συγκέντρωσης του κάθε στοιχείου μπορεί να περιγραφεί από μια μαθηματική εξίσωση της μορφής:

$$C_X = \alpha + \beta \cdot V_s + \gamma \cdot \text{dif}V_s + \delta \cdot \text{pH} + \varepsilon \cdot t \quad (1)$$

Όπου C_X = η συγκέντρωση των στοιχείων NO_3 , NH_4 , PO_4 , K σε χρόνο t.

V_s = ο συνολικός όγκος του διαλύματος που αφαιρέθηκε σε κάθε δειγματοληψία μέχρι το χρόνο t.

$\text{dif}V_s$ = ο όγκος της κάθε δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε σε χρόνο t.

pH = η τιμή του pH κατά το χρόνο t.

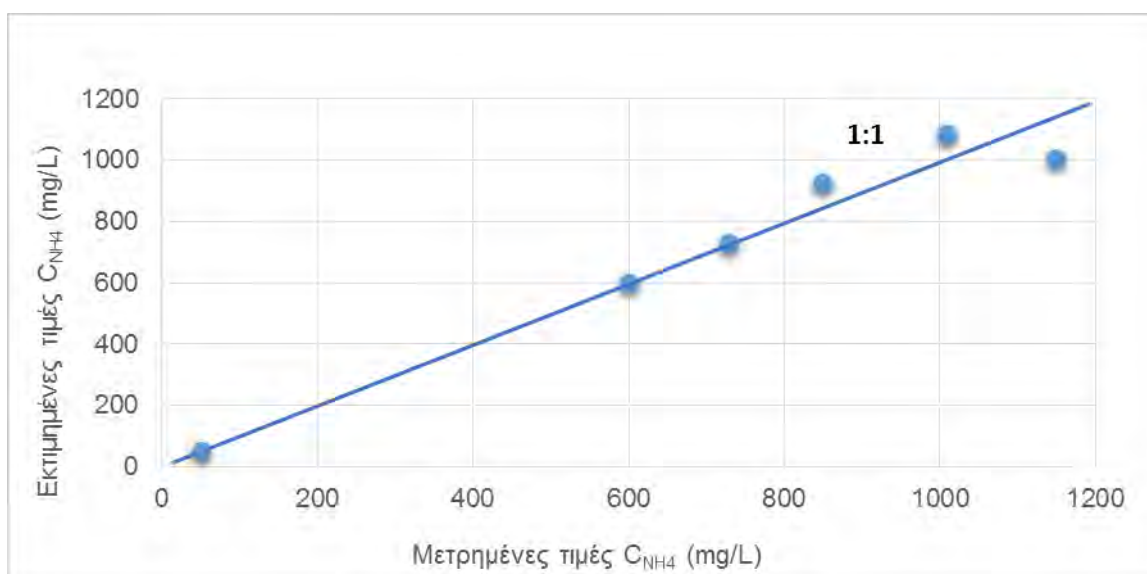
t = συνολικός χρόνος (σε ημέρες) από την ημέρα παρασκευής του διαλύματος.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σε διάλυμα 100ml το οποίο περιείχε 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 και pH 5,5, βαθμονομήθηκε η σχέση (1), με τη βοήθεια του προγράμματος STATGRAPHICS, προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι α , β , γ , δ , ε για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των στοιχείων (C_{NO_3} , C_{NH_4} , C_{PO_4} , C_K) το χρόνο t . Από την βαθμονόμηση της εξίσωσης προέκυψαν οι τιμές που φαίνονται στον Πίνακα3.

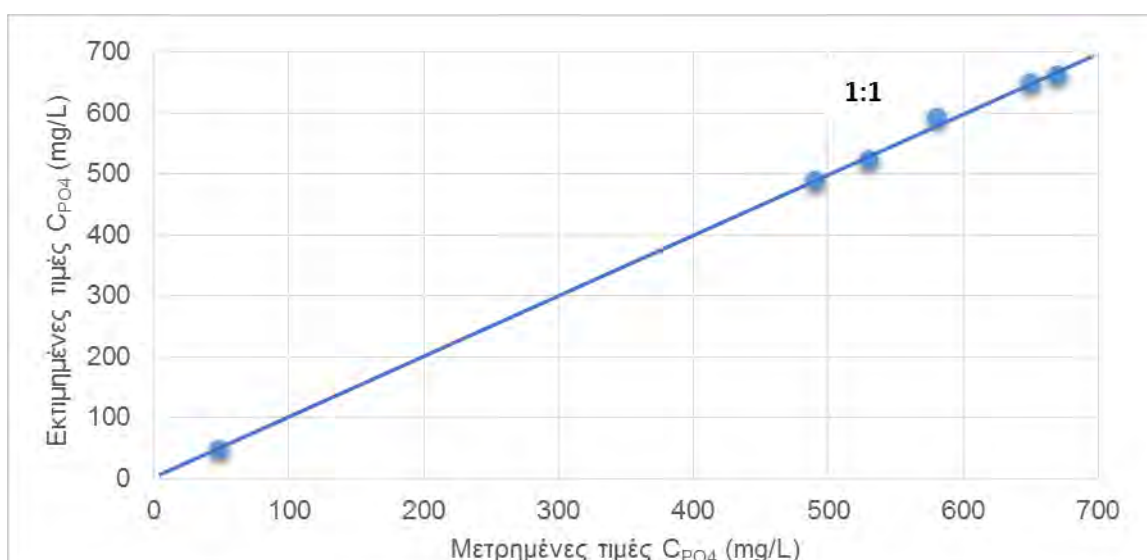
Πίνακας 3. Οι τιμές των παραμέτρων α , β , γ , δ , ε και τα όρια εμπιστοσύνης R^2 της σχέσης (1) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των στοιχείων NH_4 , PO_4 , NO_3 , K σε διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14.

C_X	α	β	γ	δ	ε	R^2
C_{NH_4}	-3852,33	15016,7	-1071,11	-405,556	-473,889	0,78
C_{PO_4}	-1301,58	3016,67	- 945,278	61,1111	-77,2222	0,99
C_{NO_3}	-6347,5	63500	-3191,67	- 3333,33	-2233,33	0,99
C_K	25692,5	-40300	-525	- 1000	1260	0,91

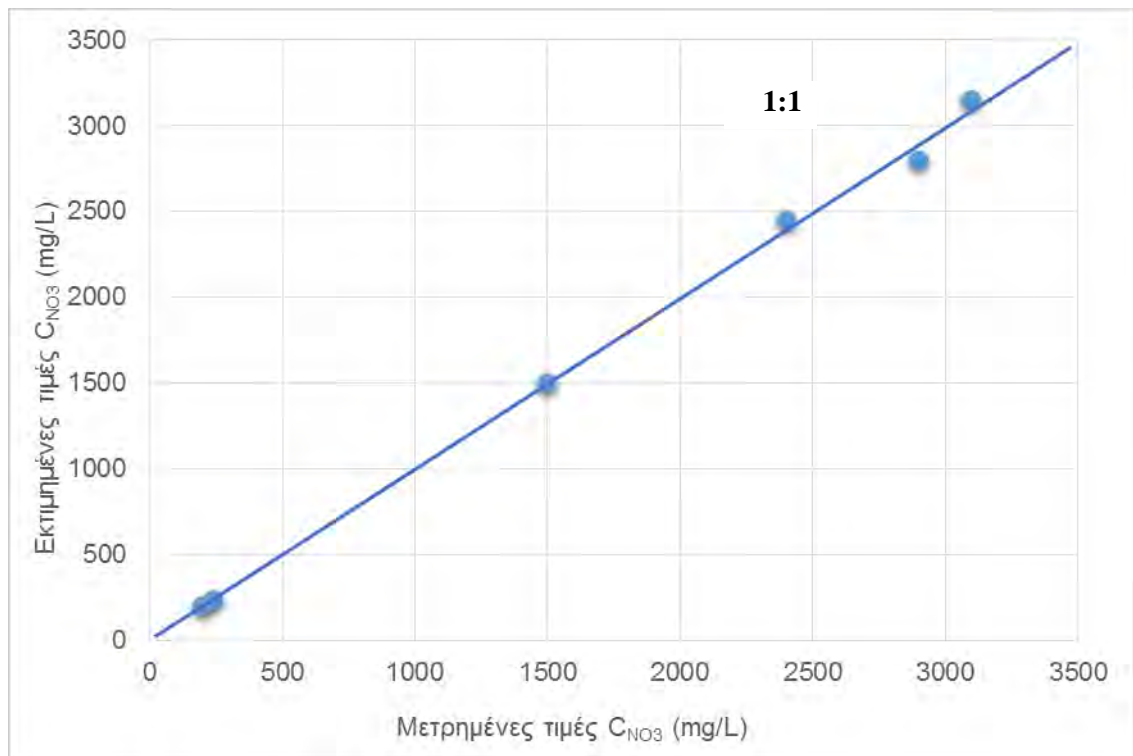
Στα παρακάτω διαγράμματα 26, 27, 28, 29 φαίνεται η συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων τιμών που προέκυψαν από τη Σχέση (1) και οι οποίες αφορούν τη συγκέντρωση των NH_4 (Διάγραμμα 26), PO_4 (Διάγραμμα 27), NO_3 (Διάγραμμα 28), K (Διάγραμμα 29) σε διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση λιπάσματος 14-14-14. Η συσχέτιση των παρακάτω τιμών είναι γραμμική, αφού η σχέση μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών είναι της μορφής $y=a*x+b$, στην οποία τα a και b δεν διαφέρουν στατιστικά από τις τιμές 1 και 0 αντίστοιχα (Gauch et al, 2003).



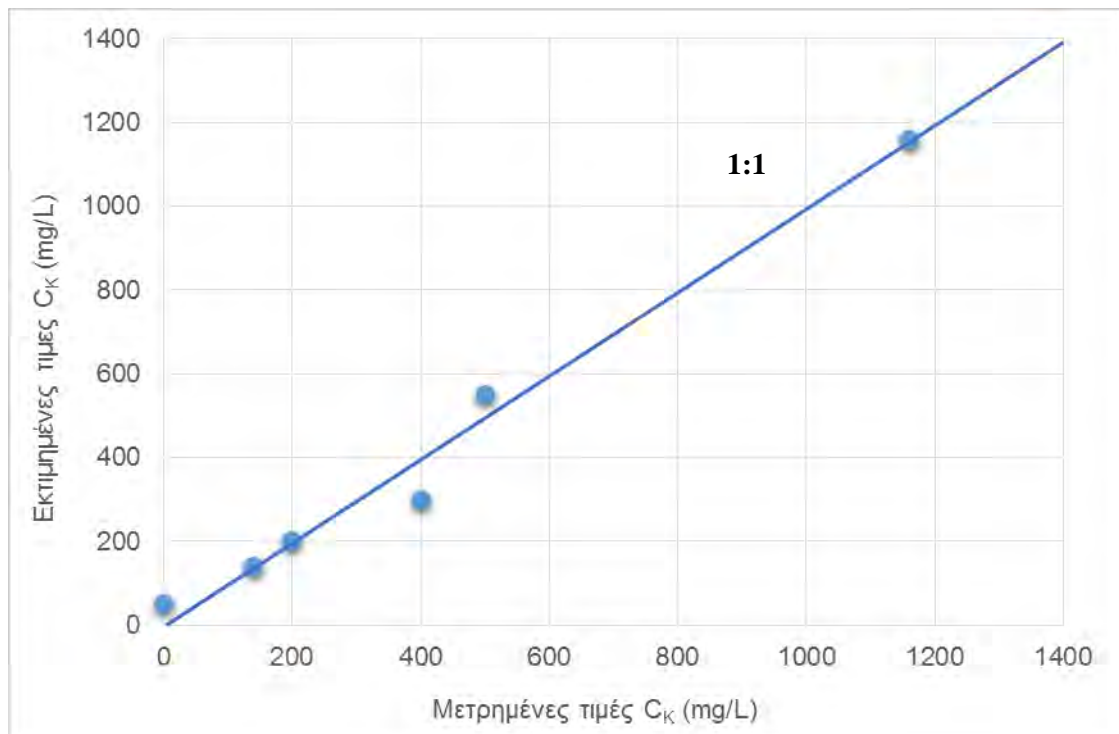
Διάγραμμα 26. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NH_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH που ρυθμίζονταν συνεχώς στην τιμή 5,5. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



Διάγραμμα 27. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των PO_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



Διάγραμμα 28. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NO_3 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



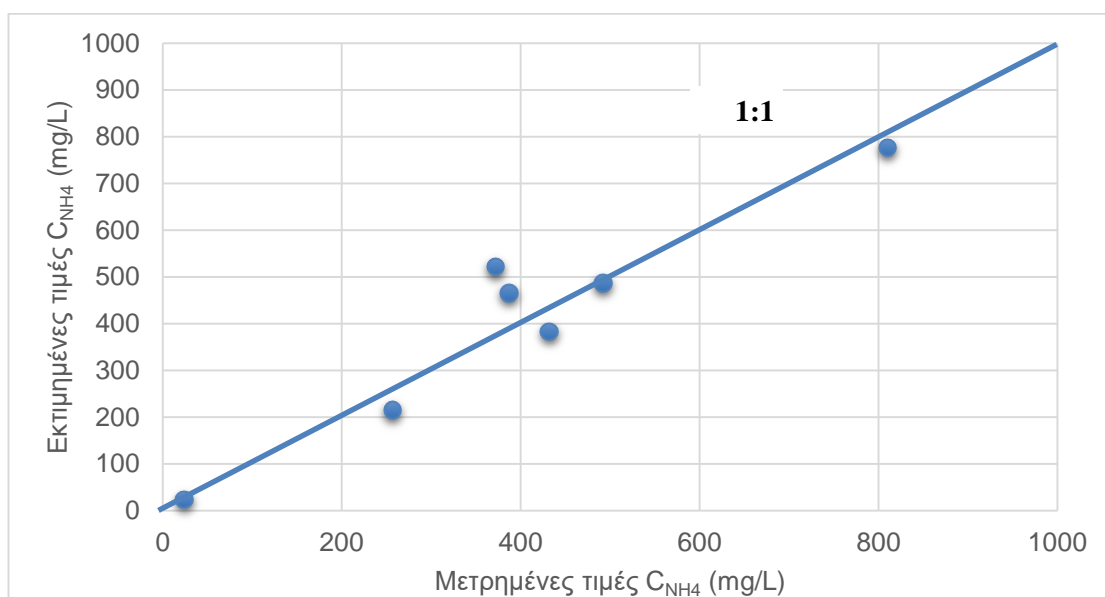
Διάγραμμα 29. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης του K, σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 14-14-14 σε 100ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σε διάλυμα 300ml το οποίο περιείχε 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 και pH 5,5, βαθμονομήθηκε η σχέση (1), με τη βοήθεια του προγράμματος STATGRAPHICS, προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι α , β , γ , δ , ε για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των στοιχείων (C_{NO_3} , C_{NH_4} , C_{PO_4} , C_K). Από την βαθμονόμηση προέκυψαν οι τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 4.

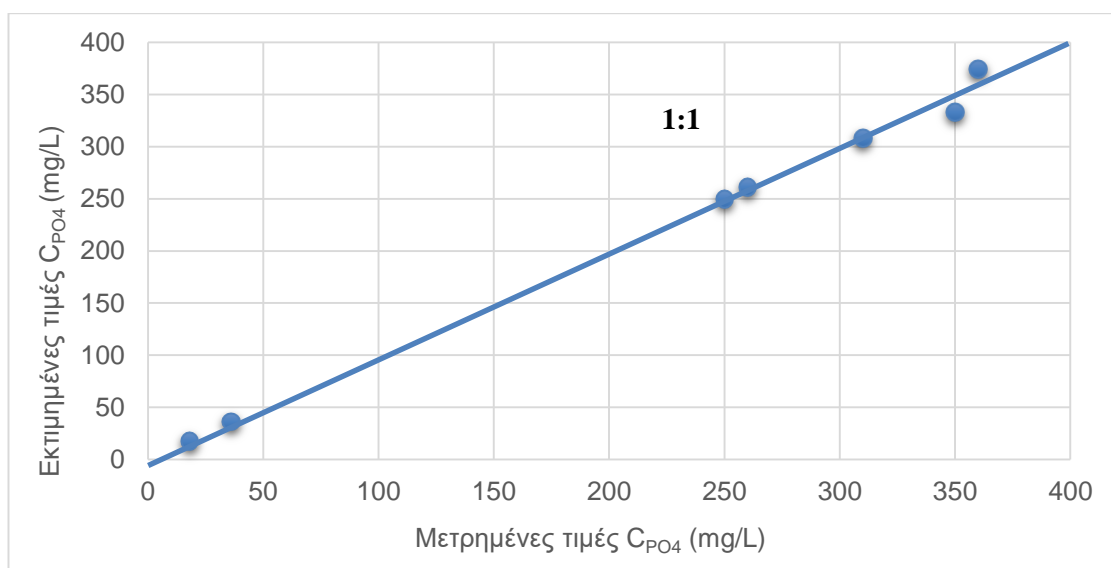
Πίνακας 4. Οι τιμές των παραμέτρων α , β , γ , δ , ε και τα όρια εμπιστοσύνης R^2 της σχέσης (1) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των στοιχείων NH_4 , PO_4 , NO_3 , K και αφορά τα διαλύματα που περιέχουν το λίπασμα 15-7-15.

C_X	α	β	γ	δ	ε	R^2
C_{NH_4}	15863,4	3307,4	- 1800,14	- 2997,53	- 106,619	0,86
C_{PO_4}	-1553,17	- 170,333	- 573,763	350,805	13,5193	0,99
C_{NO_3}	-49865	- 8680,61	1338,12	9695,82	349,24	0,95
C_K	-32142,2	1629,09	1654,68	5543,73	13,8593	0,82

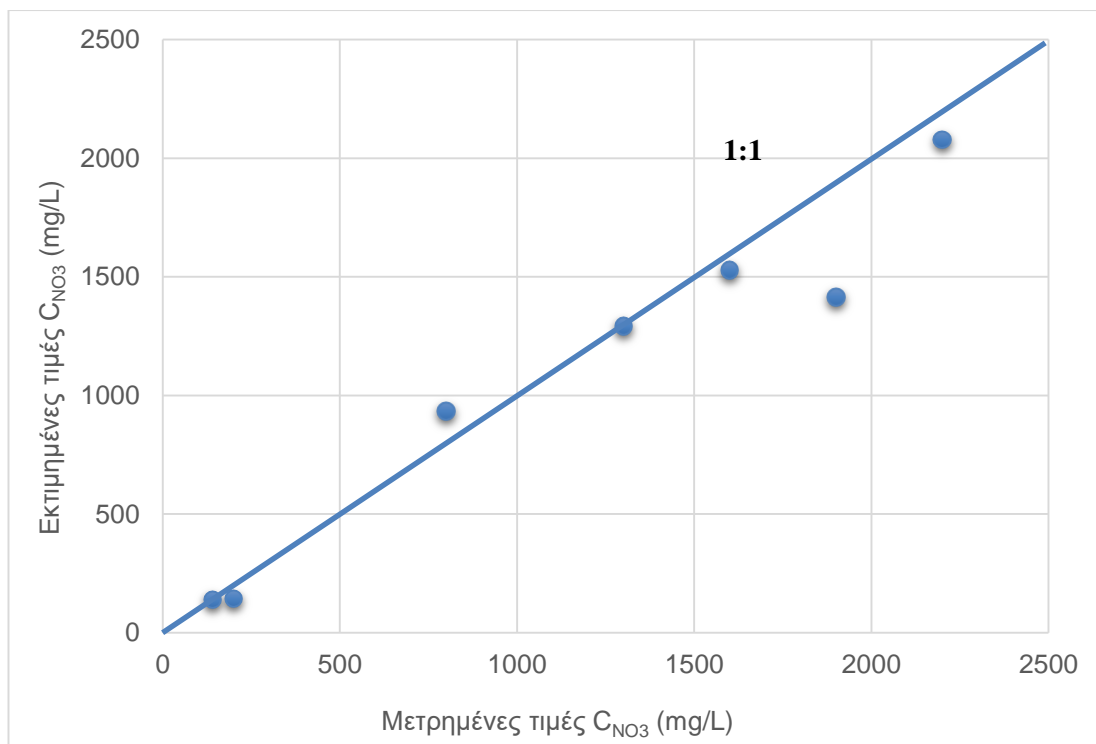
Στα παρακάτω διαγράμματα 30, 31, 32, 33 φαίνεται η συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων τιμών που προέκυψαν από τη Σχέση (1) και οι οποίες αφορούν τη συγκέντρωση των NH_4 (Διάγραμμα 30), PO_4 (Διάγραμμα 31), NO_3 (Διάγραμμα 32), K (Διάγραμμα 33) σε διαλύματα που προέκυψαν από διάλυση λιπάσματος 15-7-15. Η συσχέτιση των παρακάτω τιμών είναι γραμμική, αφού η σχέση μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών είναι της μορφής $y=a*x+b$, στην οποία τα a και b δεν διαφέρουν στατιστικά από τις τιμές 1 και 0 αντίστοιχα (Gauch et al, 2003).



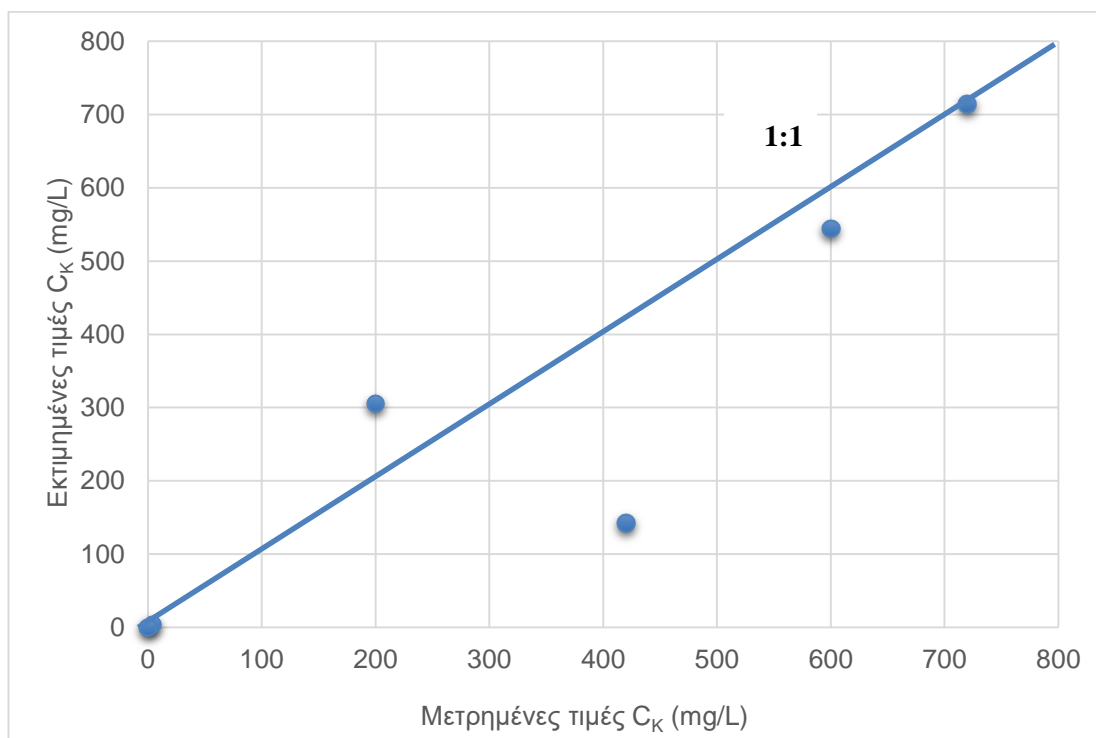
Διάγραμμα 30. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NH_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



Διάγραμμα 31. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των PO_4 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



Διάγραμμα 32. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης των NO_3 , σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.



Διάγραμμα 33. Συσχέτιση των μετρημένων και των εκτιμημένων από τη Σχέση (1) τιμών της συγκέντρωσης του K, σε διάλυμα που προέκυψε από διάλυση 0,5gr λιπάσματος 15-7-15 σε 300ml απιονισμένου νερού, σε pH 5,5 με συνεχή ρύθμιση. Η συνεχής γραμμή δίνει την 1:1 συσχέτιση.

3.7 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τη σχετική συζήτηση εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) Ανεξάρτητα από τον τύπο του λιπάσματος, τα διαλύματα με μικρούς όγκους που είχαν αρχικό pH από 5,5 έως 6,5, παρουσιάζουν καθόλου ή μικρή αύξηση της τιμής του κατά 0,5 η οποία τελικά σταθεροποιείται στην τιμή 6-6,5. Κατά συνέπεια, τα διαλύματα αυτά μπορούν να ρυθμιστούν. Σε όλες τις περιπτώσεις που τα διαλύματα αυτά παρέμειναν σε χαμηλότερη θερμοκρασία (18°C) οι μεταβολές του pH ήταν εντονότερες σε σχέση με τα διαλύματα που παρέμειναν στους 24°C.
- 2) Στα διαλύματα με μεγαλύτερους όγκους, ανεξάρτητα από τον τύπο του λιπάσματος, των οποίων οι αρχικές τιμές του pH ήταν μεγαλύτερες ή ίσες με 6, απέτυχε η ρύθμιση του pH.
- 3) Σε πυκνά διαλύματα του λιπάσματος 14-14-14, το χαμηλό pH 5,5 φαίνεται να επέδρασε ταχύτερα στη διάλυση του λιπάσματος, όπως προκύπτει από τη γρηγορότερη μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα. Αντίθετα, διαλύματα με pH 6 έως 6,5 επέδρασαν με μικρότερη ταχύτητα στη διάλυσή του λιπάσματος, με αποτέλεσμα την πιο αργή μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα.
- 4) Σε πυκνά διαλύματα του λιπάσματος 15-7-15, όταν η τιμή του pH ήταν από 5,5 έως 6 παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα διάλυσης του λιπάσματος, όπως προκύπτει από τη γρηγορότερη μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα. Αντίθετα, διαλύματα με pH 6,5 επέδρασαν με μικρότερη ταχύτητα στη διάλυσή του λιπάσματος, με αποτέλεσμα την πιο αργή μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα.
- 5) Η θερμοκρασία του διαλύματος με pH 5,5 επηρεάζει χρονικά την εξέλιξη όχι όμως τις απόλυτες τιμές των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι επιδρά στη διαλυτοποίηση και την μεταφορά του νερού από το υδατικό διάλυμα στο εσωτερικό του κόκκου και του διαλυμένου λιπάσματος από το εσωτερικό του κόκκου στο υδατικό διάλυμα, μέσω των πόρων του υλικού επικάλυψης του λιπάσματος.
- 6) Η επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών μπορεί να έχει το ίδιο αποτέλεσμα στην απελευθέρωση του στοιχείου, όπως και η μεταβολή του pH του διαλύματος από 5,5 έως 6,5.
- 7) Ανάλογα με τον τύπο του λιπάσματος το υψηλό ή το χαμηλό pH αποτελεί ισχυρότερο παράγοντα, ο οποίος καθορίζει τον τρόπο που θα λειτουργήσει ο μηχανισμός

απελευθέρωσης του στοιχείου από τον κόκκο του λιπάσματος, σε σχέση με τη θερμοκρασία η οποία καθορίζει το ρυθμό απελευθέρωσης. Και οι δύο παράγοντες καθορίζουν στη συνέχεια την πιθανότητα ιζηματοποίησης των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα.

- 8) Το pH του διαλύματος και η θερμοκρασία μπορούν να αποτελέσουν βασικούς παράγοντες σε μία στρατηγική διαχείρισης θρεπτικών διαλυμάτων σε υδροπονικές καλλιέργειες που παρασκευάζονται με χρήση λιπασμάτων CRF.
- 9) Ο μεγάλος όγκος των θρεπτικών διαλυμάτων καθυστερεί την εμφάνιση της μέγιστης συγκέντρωσης στο θρεπτικό διάλυμα, καθώς παρουσιάζεται μία χρονική υστέρηση στην επίτευξή της, ενώ στους μικρούς όγκους αυτή επιτυγχάνεται γρήγορα.
- 10) Ένα μαθηματικό προσομοίωμα στο οποίο παράγοντες αποτελούν το pH του θρεπτικού διαλύματος, ο όγκος του θρεπτικού διαλύματος και ο χρόνος από την ημέρα παρασκευής του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των NO_3 , NH_4 , PO_4 , και K, σε θρεπτικά διαλύματα που έχουν παρασκευασθεί με χρήση CRF λιπασμάτων.
- 11) Συνέχεια της εργασίας αυτής μπορεί να αποτελέσει η μελέτη και η ενσωμάτωση στη μαθηματική προσομοίωση άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία στην οποία παραμένει το θρεπτικό διάλυμα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος και να εφαρμοστούν και διαφορετικές τεχνικές όπως ανάδευση και η χρήση CRF λιπασμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά (τύπος επικάλυψης, πάχος επικάλυψης, χημική σύνθεση κλπ).

Βιβλιογραφία

- Αναστασίου Α. & Παπαγεωργίου Γ., (1999). Υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας και έλεγχος της θρέψης. *Γεωργία-Κτηνοτροφία* 9, 60-74.
- Σάββας Δ., (1998). *Υδροπονία Καλλωπιστικών Φυτών* ΤΕΙ Ηπείρου Τμήμα Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου.
- Σάββας Δ., 2003. *Γενική Ανθοκομία*,. ΤΕΙ Ηπείρου Τμήμα Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονικής Τοπίου.
- Σάββας Δημήτριος., 2011. Καλλιέργειες εκτός εδάφους: υδροπονία, υποστρώματα. Εκδόσεις Αγρότυπος.
- Μαυρογιαννόπουλος Γ.Ν., 2006. *Υδροπονικές εγκαταστάσεις*. Εκδόσεις Σταμούλη ΑΕ, Αθήνα.
- Παναγιωτόπουλος, Α.Ι., 1995α. Θρέψη και λίπανση της τομάτας. Αφιέρωμα ορθολογική λίπανση των καλλιεργειών, *Γεωργία-Κτηνοτροφία* 9: 241-248.
- Adams, P. (1991). Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *J. Hort. Sci.* 66 (2):201-207.
- Ansorena, J. (1994). Sustratos. Propiedades y Caracterización. *Mundi-Prensa*, ISBN 978-84-7114481-2, Madrid, España
- Bonachela, S., Acuña, R. A., Magan, J. J. & Malfa, O. (2010). Oxygen Enrichment of Nutrient Solution of Substrate-Grown Vegetable Crops under Mediterranean Greenhouse Conditions: Oxygen Content Dynamics and Crop Response. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol.8, No.4, (Dec 2010), pp. 1231-1241, ISSN: 1695-971-X.
- Breteler, H. & Smith, A. L. (1974). Effect of Ammonium Nutrition on Uptake and Metabolism of Nitrate in Wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Vol.22, No.1, (Jan 1974), pp. 73–81, ISSN 0028-2928.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Malorgio, M., Tognoni, F. & Pardossi, A. (2003). A Simple Model for Salt Accumulation in Closed-Loop Hydroponics. *Acta Horticulturae*, Vol.614, No.1, (September, 2003), pp. 149-154, ISSN 0567-7572.
- Christianson, C.B. (1988). Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea. *Fert. Res.* 16, 273-284.

Coic, Y. (1973). *Les Problèmes de Composition et de Concentration des Solutions Nutritives en Culture Sans Sol*, Proceedings of IWOSC 1973 3rd International Congress on Soilless Culture, pp. 158-164, Sassari, Italy, May 7-12, 1973.

Cooper, A.J. (1977). Nutritional control of a nutrient-Film tomato crop. *Sci. Hort.* 7:189-195.

De Kreijl, C. (1999). Production, blossom-end rot, and cation uptake of sweet pepper as affected by sodium, cation ratio, and EC of the nutrient solution. *Gartenbauwissenschaft* 64, 158-164.

De Rijck G. & Schrevens E. (1997) pH Influenced by the Elemental Composition of Nutrient Solutions. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.20, No.7-8, (Jul 1997) 911-923. ISSN. 0190-4167.

De Rijck G. & Schrevens E. (1997a). Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to dissociation reactions. *J. Plant Nutr.* 20(7&8):901-910.

De Rijck G. & Schrevens E. (1997b). pH influenced by the elemental composition of nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 20(7&8):911-923.

De Rijck G. & Schrevens E. (1998a) Cationic Speciation in Nutrient Solutions as a Function of pH. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.5 (May 1998), pp. 861-870, ISSN. 0190-4167.

De Rijck G. & Schrevens E. (1999) Anion Speciation in Nutrient Solutions as a Function of pH. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.22, No.2, (Feb 1999), pp. 269-279. ISSN 0190-4167.

Detrick, J. (Pursell Inc.) (1992). Answers to Frequently Asked Technical Questions about Polyon Coated Fertilizer Technology. Pursell Industries, Inc., Sylacauga, Alabama, USA.

Du, C., Zhou, J. & Shaviv, A. J Polym Environ (2006). Release Characteristics of Nutrients from Polymer-coated Compound Controlled, Release Fertilizers. *Journal of Polymers and the Environment*, July 2006, Volume 14, Issue 3, pp 223–230.

Dufour, L. & Guérin, V. (2005). Nutrient Solution Effects on the Development and Yield of *Anthurium andreanum* Lind. in Tropical Soilless Conditions. *Scientia Horticulturae*, Vol.105, No.2, (Jun 2005), pp. 269-282, ISSN 0304-4238

Ehret, D.L. & Ho, L.C. (1986). The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *J. Hort. Sci.* 61(3):361-367.

Errebhi M & Wilcox G E. (1990) Plant species response to ammonium-nitrate concentration ratios. *J. Plant Nutr.* 13, 1017-1029.

Farina, E., Allera, C., Paterniani, T. & Palagi, M. (2003). Mulching as a Technique to Reduce Salt Accumulation in Soilless Culture. *Acta Horticulturae*, Vol.609, No.1, (May 2003), pp. 459-466, ISSN 0567-7572

Fujita, T. & Shoji, S. (1999). *Kinds and properties of Meister fertilizers*. In: Meister controlled release fertilizer – Properties and Utilization. Shoji, S. (ed). Konno Printing Company Ltd. Sendai, Japan, pp. 13-34.

Fujita, T. (1993). *Technical development, properties and availability of polyolefin coated fertilizers*. Proceedings: Dahlia Greidinger Memorial International Workshop on Controlled/Slow Release Fertilizers, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.

Fujita, T., Maeda, S., Shibata, M. & Takahashi, C. (1989). Research and development of coated fertilizers. In: Proceedings: Fertilizer, Present and Future. Symposium Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition.

Fujita, T., Maeda, S., Shibata, M. & Takahashi, C. (1990a). *Research and development of coated fertilizer*. In: Proceedings: Fertilizer, Present and Future. Symposium Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition.

Gaugh, H.G.; Hwang, G.Jr.J.T., Fick, G.W., 2003. Model evaluation by comparison of model-based prediction and measured values. *Agronomy Journal*, 95, 1442-1446.

Gislerød, H. R. & Adams, P. (1983). Diurnal Variations in the Oxygen Content and Requirement of Recirculating Nutrient Solutions and in the Uptake of Water and Potassium by Cucumber and Tomato Plants. *Scientia Horticultura*, Vol.21, No.4, (Dec 1983), pp. 311–321, ISSN 0304-4238.

Goertz, H.M., (1993). *Controlled Release Technology*. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Vol.7 Controlled Release Technology (Agricultural), pp. 251

Goertz, H.M., (1995). *Technology Developments in Coated Fertilizers*. Proceedings: Dahlia Greidinger Memorial International Workshop on Controlled/Slow Release Fertilizers, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.

Hanger, B. (1993). Hydroponics: The World, Australian, and South Pacific Islands Scene. In: *Commercial Hydroponics in Australasia, A Guide for Growers*. Pro-Set Pty Ltd, Hobart.

Hansen, M. (1978). Plant Specific Nutrition and Preparation of Nutrient Solutions. *Acta Horticulturae*, Vol.82, No.1, (Apr 1978), pp. 109-112, ISSN 0567-7572.

Hauck, R.D. (1985). *Slow release and bio-inhibitor-amended nitrogen fertilisers*. In: Fertiliser Technology and Use. O.P. Engelstad (ed.) 3rd edn, pp. 293-322.

Hewitt, E. J. (1996). *Sand and Water Culture Methods Used in the Study of Plant Nutrition*. Technical Communication No. 22. Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Malling, Maidstone, Kent, England.

Holder, R. & Christensen, M.H.. (1988). *The effect of electrical conductivity on the growth, yield, and composition of cherry tomatoes grown on rockwool*. pp. 213-227. In: ISOSC, Proceedings 7th International Congress on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands.

Horchani, F., Hajri, R., & Aschi-Smiti, S. (2010). Effect of ammonium or nitrate nutrition on photosynthesis, growth, and nitrogen assimilation in tomato plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 610–617.

Islam, A.K.M.S., Edwards, D.G. & C.J. Asher. (1980). pH optima for crop growth. Results of a flowing solution culture experiment with six species. *Plant Soil* 54:339-357.

Jensen, M. H. (1999). Hydroponics Worldwide. *Acta Horticulturae*, 481, 719-730.

Jones, J.B. (2005). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. 2nd ed. CRS PRESS, Boca Raton, FL.

Jones, Jr., J.B. (1982). Hydroponics: Its history and use in plant nutrition studies. *J. Plant Nutr.* 5(8):1003-1030.

Kinoshita, T. et al. (2014). Effects of controlled-release fertilizer on leaf area index and fruit yield in high-density soilless tomato culture using low node-order pinching. *PLoS ONE*.

Klaring, H. P. (2001). Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops: a review. *Agronomie* 21, 311-321.

Lammel, J. (ed.) (2005). *Cost of the different options available to the farmers: Current situation and prospects*. In IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, pp.1–9.

Landowne, D. (2006). *Cell Physiology*, McGraw-Hill Medical Publishing Division, ISBN 0071464743, Miami, FL., U. S. A.

Liang, R., Liu, M. & Wu, L. (2006). Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention.

Liu, F. L. & Wang Z.M. (2007). *Science and Technology Consulting Herald.*, 20, 246.

Liu, G. et al., (2015). Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools, University of Florida.

Lorenzo, H., Cid, M. C, Siverio, J. M. & Caballero, M. (2000). Influence of Additional Ammonium Supply on Some Nutritional Aspects in Hydroponic Rose Plants. *The Journal of Agricultural Science*, Vol.134, No.4, (Sep, 2000), pp. 421-425, ISSN 00218596.

Lykas, C. H., Giaglaras, P. & Kittas, C. (2001). Nutrient Solution Management Recirculating Soilless Culture of Rose in Mild Winter Climates. *Acta Horticulturae*, Vol.559, No.1, (Oct 2001), pp. 543-548, ISSN 0567-7572.

Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants, *Academic Press*, ISBN 0-12-473542-8, New York, U. S. A.

Mikkelsen R. L., (2011), The “4R” Nutrient Stewardship Framework for Horticulture. *HortTechnology*. 21(6): 658–662.

Moore, W.P. (1995). *Reacted layer technology for controlled release fertilisers*. In “Proc. of Dahlia Greidinger Memorial Int. Workshop on Controlled/Slow Release Fertilisers. Mar. 1993” (Y. Hagin, et al. Eds.), Technion, Haifa.

Morard, P. & Silvester, J. (1996). Plant Injury Due to Oxygen Deficiency in the Root Environment of Soilless Culture: A Review. *Plant and Soil*, Vol.184, No.2, pp. 243-254, ISBN 0032-079X.

Moustafa, A.T. & J.V. Morgan. (1983). Influence of solution concentration on growth, flower quality and nutrient uptake in spray chrysanthemum. *Acta Hort.* 133:13-24.

Nemali, K. S. & Van Iersel, M. W. (2004). Light Intensity and Fertilizer Concentration: I. Estimating Optimal Fertilizer Concentration from Water-Use Efficiency of Wax Begonia. *HortScience*, Vol.39, No.6, (Oct 2004), pp. 1287-1292. ISSN 0018-5345

Papadopoulos, A. P., Hao., X., Tu, J. C. & Zheng, J. (1999). Tomato Production in Open or Closed Rockwool Culture Systems with NFT or Rockwool Nutrient Feedings. *Acta Horticulturae*, Vol.481. No.1, (Jan 1999), pp. 89-96, ISSN 0567-7572.

Papadopoulos, A.P. & Liburdi, N. (1989). The «Harrow Fertigation Manager»- a computerized multifertilizer injector. *Acta Hort.* 260, 255-265.

Pursell Inc. (1992). *Coating Thickness Effects. Nutrient Release and Nutrient Analysis*. Pursell Industries, Inc., Sylacauga, Alabama, USA.

Pursell Inc. (1994). *Temperature Effect on Release of Polyon PCU*. Pursell Industries, Inc., Sylacauga, Alabama, USA.

Raban, S. (1994). “*Release mechanisms of membrane coated fertilisers*”. M.Sc. Thesis, Agric. Engn. Technion-IIT. (Hebrew; contents, extended abstract, figures and tables in English).

Raban, S., Zeidel E. & Shaviv, A. (1997). *Release Mechanisms Controlled Release Fertilisers in Practical Use*. In “Third Int. Dahlia Greidinger Sym. on Fertilisation and The Environment” (J.J. Mortwedt, and A. Shaviv, Eds.), pp. 287-295. April 1997, Technion, Haifa. The Netherlands

Raven, J. A. (1985). Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: A cost benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytol.* 101, 25–77.

Rouphael, Y. & Colla, G. (2009). The Influence of Drip Irrigation or Subirrigation on Zucchini Squash Grown in Closed-Loop Substrate Culture with High and Low Nutrient Solution Concentrations. *HortScience*, Vol.44, No.2, (Apr 2009), pp. 306-311, ISSN 0018-5345

Salisbury, F. B. & Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, ISBN 0-534-15162-0, California, U. S. A.

Savvas D. & Adamidis K. (1999). Automated Management of Nutrient Solutions Based on Target Electrical Conductivity, pH, and Nutrient Concentration Ratios. *J. Plant Nutr.* 22(9), 1415-1432.

Sawas, D. (1992). Vegetatives und generatives Wachstum bei Auberginen (*Solanum melongena* L.) in Hydrokultur in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit der Nährlösung. Ph.D. dissertation, University of Bonn, Bonn, Germany.

Semelová V. & Hejzman, M., Pavlů, V. & Vacek, S. (2008). Agriculture, *Ecosystems and Environment.*, 123, 337–342.

Seymour G. (1993). Review of Commercial Hydroponic Crop Production Systems In: *Commercial Hydroponics in Australasia*. A Guide for Growers, Pro-Set Pty Ltd, Hobart.

Shaviv, A. (1996). Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled release N fertilisers. In “*Progress in Nitrogen Cycling Studies*” (Van Cleemput et al. Eds.), p. 285-291. Kluwer Academ Pub.

Shaviv, A. (2000). Advances in Controlled Release of Fertilizers. "*Advances in Agronomy*", 71:1-49 Word version, before printing. Faculty of Agricultural Engineering, Technion, IIT

Shaviv, A. (2005): *Controlled Release Fertilizers*. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association Paris, France.

Shaviv, A., Raban, S. & Zaidel, E. (2003). Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules. *Environmental Science and Technology*. 37 (10), pp 2251–2256.

Shoji, S. & Gandeza A.T. (1992). *Controlled release fertilizers with polyolefin resin coating*, Kanno Printing Co. Ltd. Sendai, Japan.

Siddiqi, M. Y., Kronzucher, H. J., Britto, D. T. & Glass, A. D. M. (1998). Growth of a Tomato Crop at Reduced Nutrient Concentrations as a Strategy to Limit Eutrophication. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.9, (Sep 1998), pp. 1879-1895. ISSN 0190-4167

Soladome (2001). Available on line: <http://www.olis.net.au/soladome/what.html>.

Sonneveld, C. & G.W.H. Welles. (1984). *Growing vegetables in substrates in the Netherlands*,. pp. 613-631. In: ISOSC, Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands.

Sonneveld, C. & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Springer, ISBN 9048125316, New York, U. S. A.

Sonneveld, C. & W. Voogt. (1993). The concentration of nutrients for growing *Anthurium andreaeanum* in substrate. *Acta Hort*. 342:61-67.

Sonneveld, C. (1989). Rockwool as a substrate in protected cultivation. *Chronica Hort*. 29:33-36.

Sonneveld, C. (2000). Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD. Thesis. University of Wageningen, The Netherlands.

Sonneveld, C. (2002). Composition of nutrient solutions. In Savvas, D., Passam, H.(eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp.179-210.

Steiner, A. A. (1961). A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant and Soil*, Vol.15, No.2, (October, 1961), pp. 134-154, ISBN 0032-079X.

Steiner, A. A. (1966). The Influence of Chemical Composition of a Nutrient Solution on the Production of Tomato Plants. *Plant and Soil*, Vol.24, No.3, (June 1966), pp. 454-466, ISBN 0032-079X.

Steiner, A. A. (1968). *Soilless Culture*. Proceedings of the IPI 1968 6th Colloquium of the International Potash Institute, pp: 324-341, Florence, Italy.

Steiner, A. A. (1973). *The Selective Capacity of Tomato Plants for Ions in a Nutrient Solution*. Proceedings of IWOSC 1973 3rd International Congress on Soilless Culture, pp. 43-53, Sassari, Italy, May 7-12, 1973.

Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. Proceedings Congress of Soilless Culture, pp. 83-95.

Stradiot, P. (2005). Nutrient management in protected cropping: the need for automated control. *Acta Hort.*697, 223-230.

Taiz, L. & Zeiger, E. (1998). *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, ISBN : 0878938311, Massachusetts, U. S. A.

Timilsena Y. P., Adhikari R., Casey P., Muster T., Gilla H. & Adhikaria B. (2015). Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of Science, Food and Agriculture*; 95: 1131-1142. Available at: <<http://www.wileyonlinelibrary.com>>

Tomaszewska M. & Jarosiewicz A. (2002). Use of Polysulfone in Controlled-Release NPK Fertilizer Formulations. *J. Agric. Food Chem.*, 50 (16), pp 4634-4639.

Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C. & Alcántar G. G. (2007). Elementos Benéficos, In: Nutrición de Cultivos, G. Alcántar G & L. I. Trejo-Téllez, L. I. (Eds.), 50-91, Mundi Prensa, ISBN 978-968-7462-48-6, México, D. F., México

Trenkel, M.E. (1997): Improving Fertilizer Use Efficiency. Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture. The International Fertilizer Industry Association, Paris.

Trenkel, M.E. (2010). Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA) Paris, France.

Urrestarazu, M. (2004). Tratado de Cultivo sin Suelo. *Mundi-prensa*, ISBN 84-8476-139-8, Madrid, España

Van Os, E., Gieling, T.H. & Lieth, J.H. (2008). Technical equipment in soilless production systems. In *Soilless Culture: Theory and Practice*.

Voogt, W. (2002). Potassium management of vegetables under intensive growth conditions, In: *Potassium for Sustainable Crop Production*. N. S. Pasricha & S. K. Bansal SK (eds.), 347-362, International Potash Institute, Bern, Switzerland

Wang, S., Alva, A., Li, Y., Zhang, M., 2011. A Rapid Technique for Prediction of Nutrient Release from Polymer Coated Controlled Release Fertilizers. *Open Journal of Soil Science*, 1, pp.40–44. Available at: <http://www.scirp.org/journal/ojss>.

Willumsen, J. (1980). pH of the flowing nutrient solution. *ActaHort*. 98:191-199.

Zekki, H., Gauthier, L. & Gosselin A. (1996). Growth, Productivity and Mineral Composition of Hydroponically Cultivated Greenhouse Tomatoes, With or Without Nutrient Solution Recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol.121, No.6, (Nov 1996), pp. 1082-1088, ISSN 0003-1062.

Zheng, Y., Graham, T. H., Richard, S. & Dixon, M. (2005). Can Low Nutrient strategies be Used for Pot Gerbera Production in Closed-Loop Subirrigation? *Acta Horticulturae*, Vol.691, No.1, (October 2005), pp. 365-372. ISSN 0567-7572